

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE BARCELONA**

PROGRAMA DE DOCTORADO DE INGENIERÍA DEL TERRENO

**VALIDACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL
TERRENO DE PRECISIÓN A PARTIR DE DATOS LÁSER
ESCÁNER AEROTRANSPORTADO; APLICACIÓN A LA
MARISMA DEL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA**

AUTOR

ENRIC IBÁÑEZ MARTÍNEZ

DIRECTOR

JOSEP A. GILI RIPOLL

BARCELONA, ABRIL DE 2008

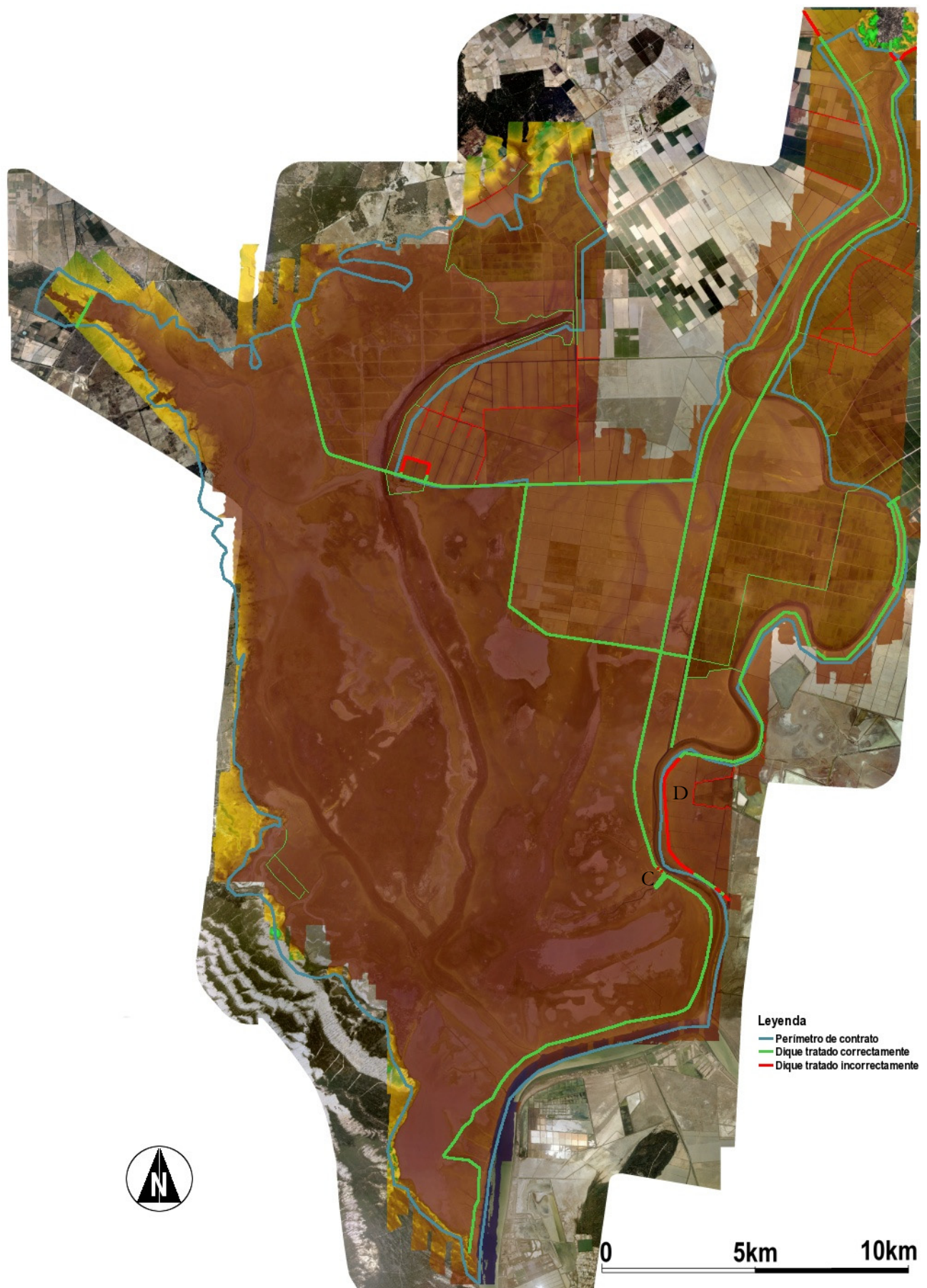


Figura 5.36. Doñana: disposición de los diques o muros inspeccionados en el área del levantamiento esquematizados sobre el MDT con la ortofotografía. En azul el límite del contrato. En rojo y verde los diques inspeccionados. Explicación en el texto. Cartografía base: ortofotografía y

Así para los cálculos en la Marisma del Parque Nacional, sólo se ha considerado esencial la reparación de la sección del muro mal representado de la figura 5.38. El resto de errores encontrados no son críticos para los análisis hidráulicos que se pretenden realizar en el modelo.

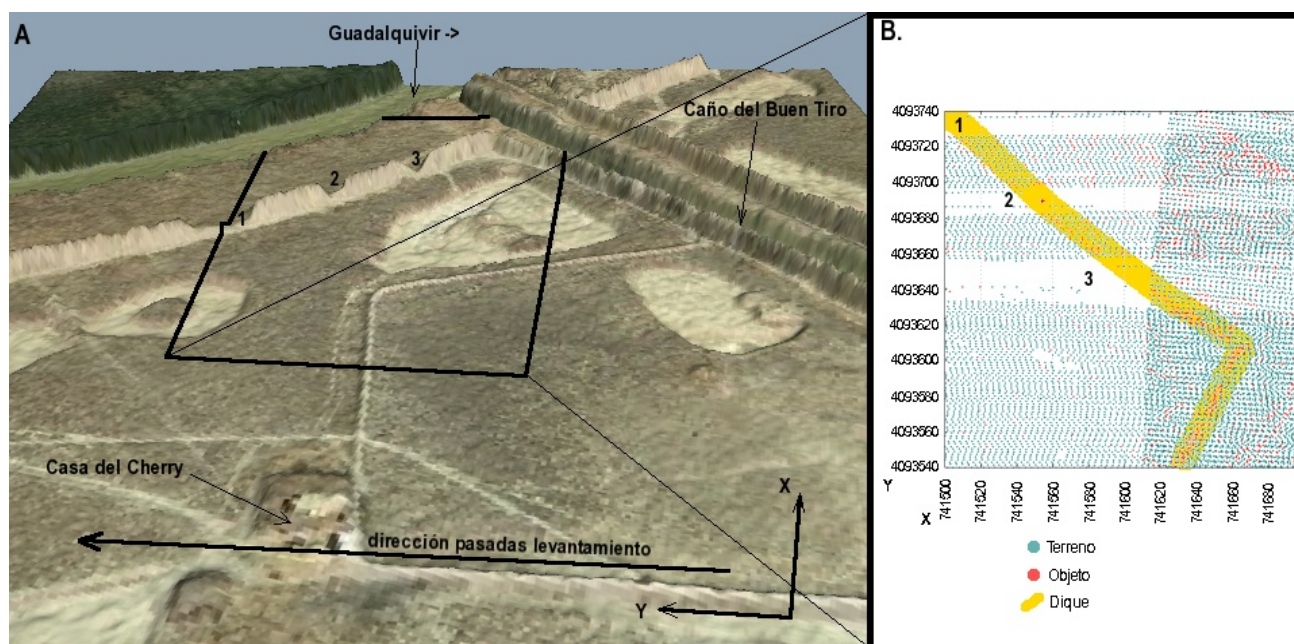


Figura 5.38. Visualización de tres secciones (1, 2, 3) en el dique que cierra el Caño del Buen Tiro (área C, figura 5.36). **A:** MDT en 3D al que se ha fusionado la ortofotografía (escala vertical exagerada 9 veces). **B:** Ampliación con los puntos clasificados como terreno (verde) y objeto (rojo), y el dique en amarillo. Cartografía base: ortofotografía y MDT *LiDAR*. Proyección *UTM*, huso 29N, coordenadas *X* e *Y* en metros. Datum *ED50*.

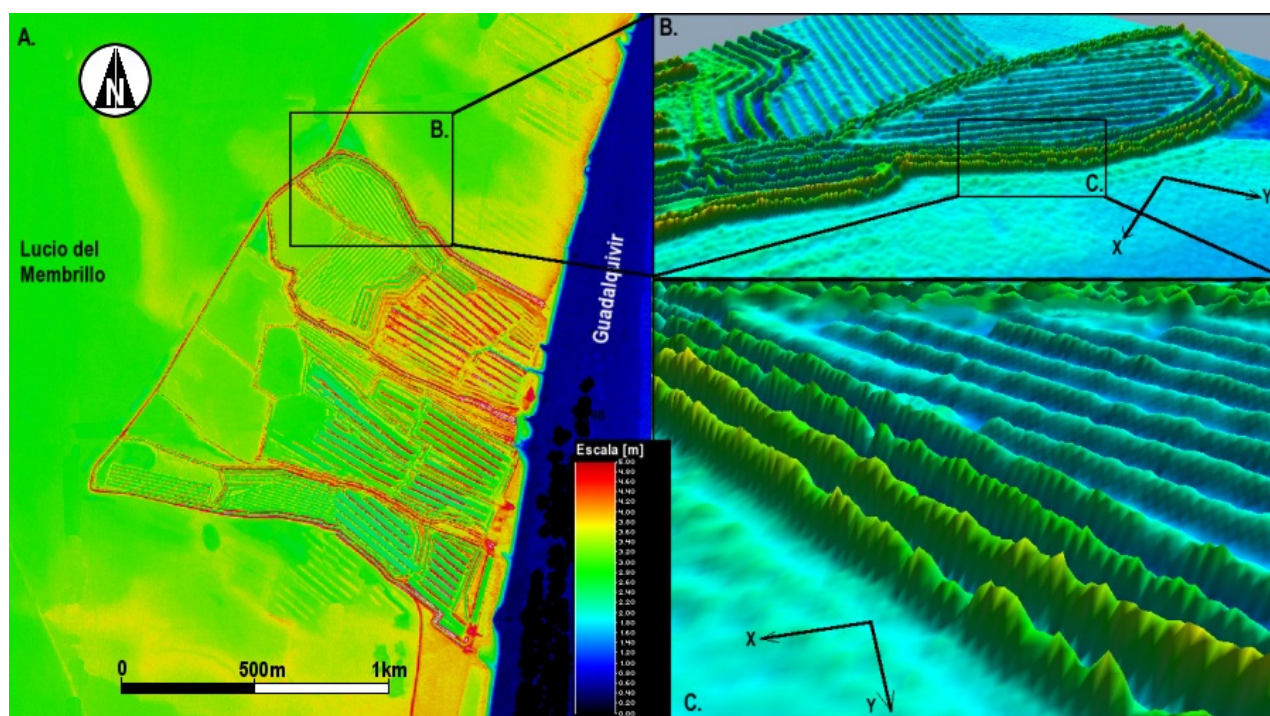


Figura 5.39. Visualización en tres dimensiones de un conjunto de diques de un ancho menor a la resolución del modelo (2m) en las Salinas de San Isidoro (Sur del levantamiento). Se ha ampliado un área con una vista general de los diques (B), y una de proximidad con la primera fila de diques (C). Cartografía base: MDT *LiDAR*.

- Objetos con zonas de sombra (puentes, pasarelas y compuertas)

Dentro del MDT *ALS* existen elementos vitales para un MDT de hidrología superficial como los puentes, pasarelas y las compuertas que aíslan la Marisma de las influencias de las mareas a través del Río Guadalquivir y del Brazo de la Torre, y junto con el sistema de diques, permiten regular los niveles de agua en la Marisma. Debajo de estos elementos no hay información *ALS* y distinguir entre ellos es una tarea muy compleja.

La definición de todos estos elementos es básica para los usos hidráulicos del modelo. La detección automática de cada elemento no es sencilla. En la figura 5.40 se presenta un esquema de los distintos tipos de pasarelas y compuertas presentes en el levantamiento y cuál debe ser su tratamiento en el modelo. La estructura del MDT no permite más de una elevación para un nodo. Esto impide modelar huecos como los de las estructuras de la figura. El tratamiento propuesto (mostrado en la figura) corrige los elementos con esta restricción. En las pasarelas debe eliminarse el tablero superior. En las primeras compuertas (A, figura 5.40) debe eliminarse la losa para el tráfico rodado, pero debe conservarse la altura máxima de la compuerta (h_c) en el caso que se considere cerrada (A.2). Para la segunda clase de compuertas (B, figura 5.40) debe mantenerse la altura completa del dique en caso de considerar cerrada la compuerta (B.2) y la cota inferior de la válvula de cierre de la compuerta como cota del canal que se crea para permitir el paso de agua a través del dique (B.1).

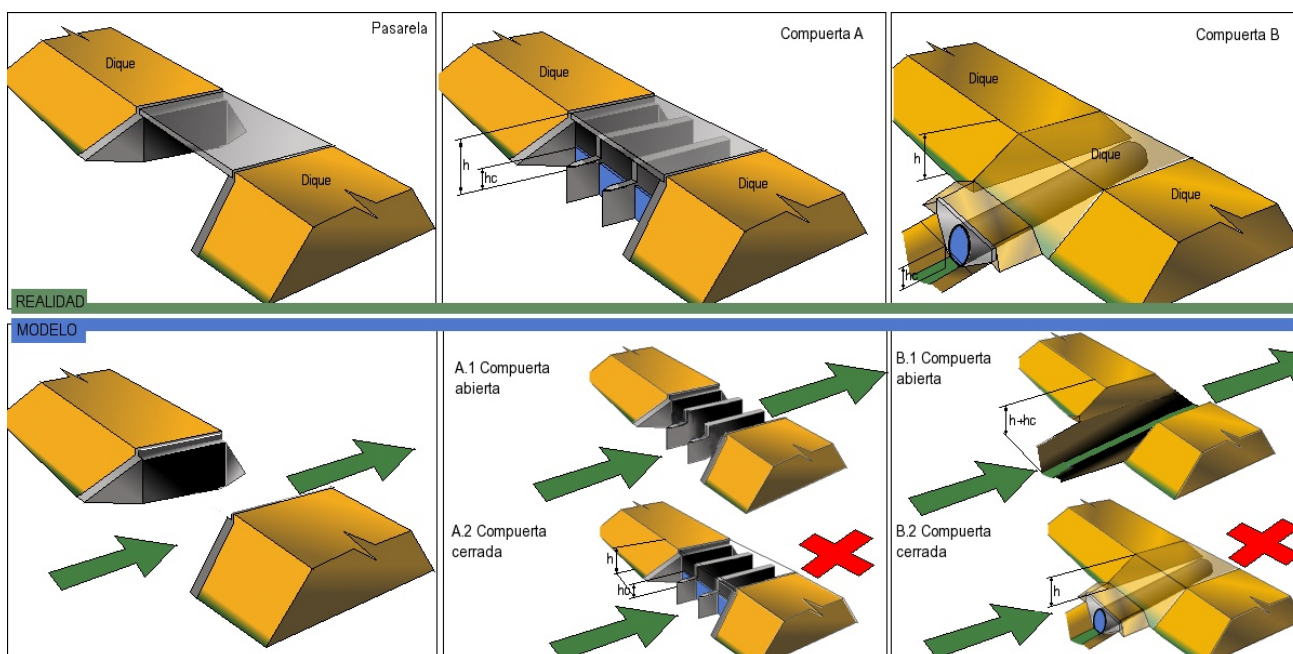


Figura 5.40. Esquema de los tres tipos de objetos con zonas de “sombra” presentes en el área del levantamiento. A la izquierda una pasarela con una losa en coronación para el tránsito rodado. En el centro una compuerta bajo una losa para el tránsito rodado. A la derecha una compuerta con válvula de cierre. En la parte inferior el tratamiento que deben tener estos elementos en el MDT. En el caso de las compuertas se indica qué elevaciones deben preservarse en función de su tipo y si permiten el flujo a través del dique o lo cierran (A.1/A.2 – B.1/B.2).

La detección automática de una pasarela o una compuerta (tipo A, figura 5.40) no es posible sólo con los datos *LiDAR*. El mecanismo que regula el paso de agua está debajo del tablero para el tráfico rodado y está oculto para el sensor *ALS*. Distinguir entre una pasarela y una compuerta requiere, entonces, trabajo de campo para obtener una solución óptima y tratar correctamente estos elementos.

En la figura 5.41 se presentan dos pasarelas y cómo han sido tratadas en el MDT. En la primera (A) se observa que en la ampliación (A.1) las medidas que han impactado sobre la solera han sido clasificadas todas como objeto. En cambio, en la segunda (B) se observa en la ampliación (B.1) que hay puntos *LiDAR* clasificados como terreno sobre la solera de la pasarela (ceranos al eje de circulación). Estos puntos han preservado la pasarela como una barrera en el MDT.

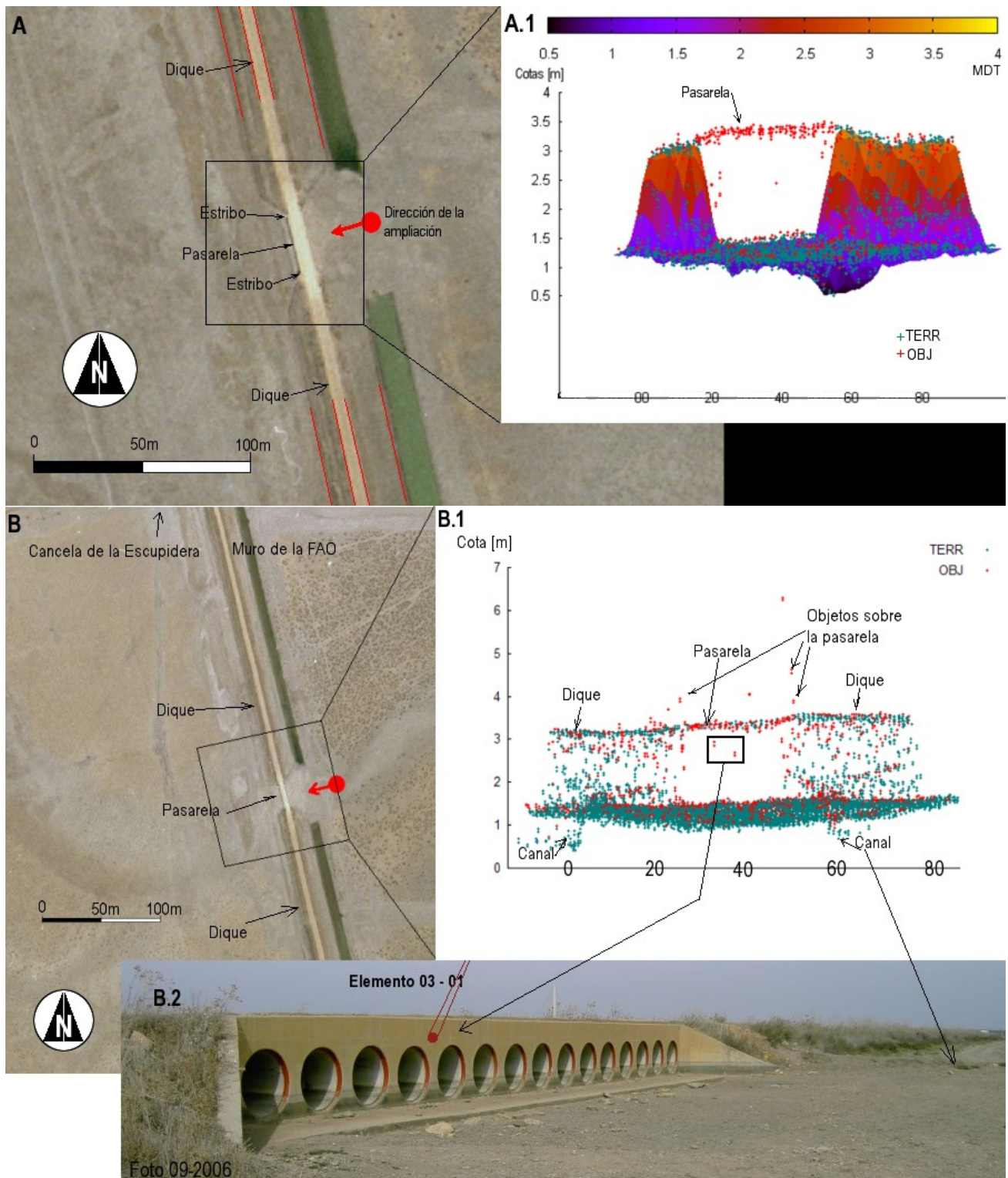


Figura 5.41. A: Pasarela para el tráfico rodado en el muro de la *FAO* o de la *Confederación*. A la derecha (A.1) el MDT con los puntos clasificados en terreno (TERR) y objeto (OBJ) con la pasarela eliminada del modelo. B: Pasarela para el tráfico rodado en el mismo muro de la *FAO*. B.1: Ampliación con los puntos clasificados como objeto y terreno. Se observa que hay puntos clasificados como terreno en la pasarela y por tanto no se ha eliminado del modelo. B.2: Detalle de la posible explicación de los dos impactos bajos marcados en B1. Cartografía base: ortofotografía y MDT *LiDAR*.

Como se ha presentado en la figura 5.40, en las pasarelas el tratamiento correcto es eliminar la losa superior para reflejar su comportamiento en estudios de hidráulica superficial (no impide el paso de las aguas). En general, siempre será necesario un cierto trabajo de revisión adicional en el campo para conseguir un tratamiento correcto.

Estos elementos sólo habían sido tratados en el proceso de edición manual entre los filtros de clasificación de la nube de puntos *ALS* 1 y 2 (ver epígrafe 5.1.1). Así, en el segundo caso (B, figura 5.41) no se había tratado correctamente el elemento. Sólo se aplicó un proceso automático usando la línea de rotura del dique que ha preservado los puntos más alejados de los cambios de pendiente, siendo este cambio mayor en la compuerta que en el dique. Eso explica que se hayan preservado los puntos cercanos al eje (la compuerta se ha comportado como un objeto adosado).

La detección de estos elementos requiere obtener información debajo del tablero. Un medio para obtenerla sería incrementar el ángulo de escaneado máximo (β), pero esto incrementa mucho el error asociado a los datos (capítulo 2). La otra opción sería incrementar el solape al máximo (100%) para tener siempre información de un mismo objeto desde dos sentidos. Pero estas medidas son a nivel de planeamiento del levantamiento y tampoco aseguran la detección. El trabajo de campo es básico para reconocer estos elementos para su comprobación en un proceso de edición manual.

En el epígrafe 5.3.2 (comprobaciones específicas) se presenta el análisis de estos elementos realizado en el contorno del Parque Nacional y un estudio individualizado de cada una de estas pasarelas y compuertas se presenta en el anejo II.

- Vegetación

Los errores inducidos únicamente por la vegetación son dos: la poca representatividad del modelo por bajas densidades de puntos clasificados como terreno y los falsos puntos elevados. El primero, en el caso estudiado, se pone de manifiesto con las facetas triangulares de la malla *TIN* apreciables a simple vista en las áreas con baja densidad de puntos terreno (caso similar a los límites en cuerpos de agua en lagunas – epígrafe 5.3.1.3). El segundo error genera falsas sobreelevaciones en el MDT (primer punto de este epígrafe, puntos falsos).

Los errores más graves, debido a su mayor influencia espacial, son consecuencia de una baja densidad de puntos clasificados como terreno. Para localizar los debidos a la vegetación es esencial localizar las áreas de baja densidad y penetración después de un proceso de clasificación (figuras 5.23 y 5.24).

Esencialmente en el levantamiento se encuentran dos tipos de vegetación problemáticas para el filtro de clasificación.

El primer tipo son agrupaciones de porte alto y densidad alta o media, como son los eucaliptales (alto porte y alta densidad) y los pinares (alto porte y densidad media). Ambos se encuentran en los márgenes de la Marisma. El efecto que producen es una baja representatividad del modelo en el caso de los eucaliptales (figura 5.42) y falsos puntos elevados (ya tratados, figura 5.35) que si se dan en terrenos en pendiente (por ejemplo al pie de las dunas o de los diques) se adosan al terreno (se comportan como un objeto adosado). En la figura 5.42 se ha marcado en rojo el límite del área boscosa representada en el modelo. En el mapa de pendientes y de orientaciones se observan las facetas triangulares debidas a la baja densidad de puntos debajo del arbolado.

El segundo grupo de vegetación es densa, húmeda y de porte bajo, como los arrozales o la Marisma de castañuela y juncal (capítulo 4). Generan también pérdidas de representatividad del Modelo Digital de Elevaciones debido a una baja densidad de puntos clasificados como terreno. En los arrozales (D, figuras 5.23 y 5.24) no hay diferencias significativas entre las áreas con sólo un tratamiento automático y las que además han tenido inspección visual (la ampliación D de las figuras se encuentra dentro del área de contrato donde ha habido una inspección visual). El porcentaje de puntos clasificados como terreno es en casi toda su área inferior al 5% de los medidos. Se aprecian facetas triangulares de la *TIN* en el Modelo Digital del Terreno de decenas de metros en sus lados (modelo original en el anejo digital IV y corrección del área en la figura II.12 del anejo II). Morfológicamente son áreas extremadamente llanas con canales y diques de pequeñas dimensiones delimitando los campos.

La vegetación tipo junco (densa y porte bajo) se encuentra en los cauces dentro de la Marisma (B, figuras 5.23 y 5.24), siendo áreas deprimidas inundadas casi permanentemente (C, figuras 5.23 y 5.24). En la figura 5.43 se presenta el curso del Guadamar, poblado por este tipo de vegetación (la fotografía con la vegetación al Norte del corte P1 se presenta en B.1 de la figura 5.25). Se han realizado tres cortes en áreas del cauce con baja densidad y penetración. En estos perfiles se observa cómo el MDT preserva la información de los cauces (P-1.A, P-2.A y P-3.A-figura 5.43).

Los perfiles de la figura indican que las medidas láser en general han conseguido penetrar este tipo de vegetación y dar información del terreno. En Rosso *et al.* [2006] se presentan perfiles de control del MDT *LiDAR* con levantamientos realizados con estación total. El estudio realizado en la marisma de la bahía de San Francisco ha detectado diferencias máximas entre el MDT y el terreno real de 25cm en áreas pobladas por la espartina (vegetación de marisma con influencia mareal que se organiza en agrupaciones de bajo porte y muy densas- ver disposición en Doñana en el capítulo 4).

En el perfil P-1.A (figura 5.43) se muestra en el MDT una elevación central de unos 25cm de altura y 400m de ancho que coincide con un área con juncas (figura 5.25 - B.1). Se puede pensar que esta sobreelevación no es natural y se debe a que la medida láser no ha sido capaz de llegar al terreno adecuadamente. Pero primeramente, la vegetación en la sobreelevación y en el subcauce de la derecha (P-1.A) tiene el mismo porte. Además, en la ortofotografía no se observan diferencias de vegetación entre ambas zonas (sobreelevación y subcauce derecho). La sobreelevación coincide con una valla de dirección aproximada Norte-Sur que separa por la mitad el curso del Guadiamar (como la que se ve en la figura 5.25), siendo posible que los postes de la valla y las agrupaciones de vegetación favorezcan la sedimentación en su entorno. Pero sin información de campo no se puede asegurar que la elevación en el cauce no sea un artefacto del modelo. Además en el epígrafe 5.3.2 se ha comprobado que no altera el funcionamiento del Caño del Guadiamar (como ya se ha indicado en las figuras 5.26 y 5.27 del epígrafe 5.3.1.2).

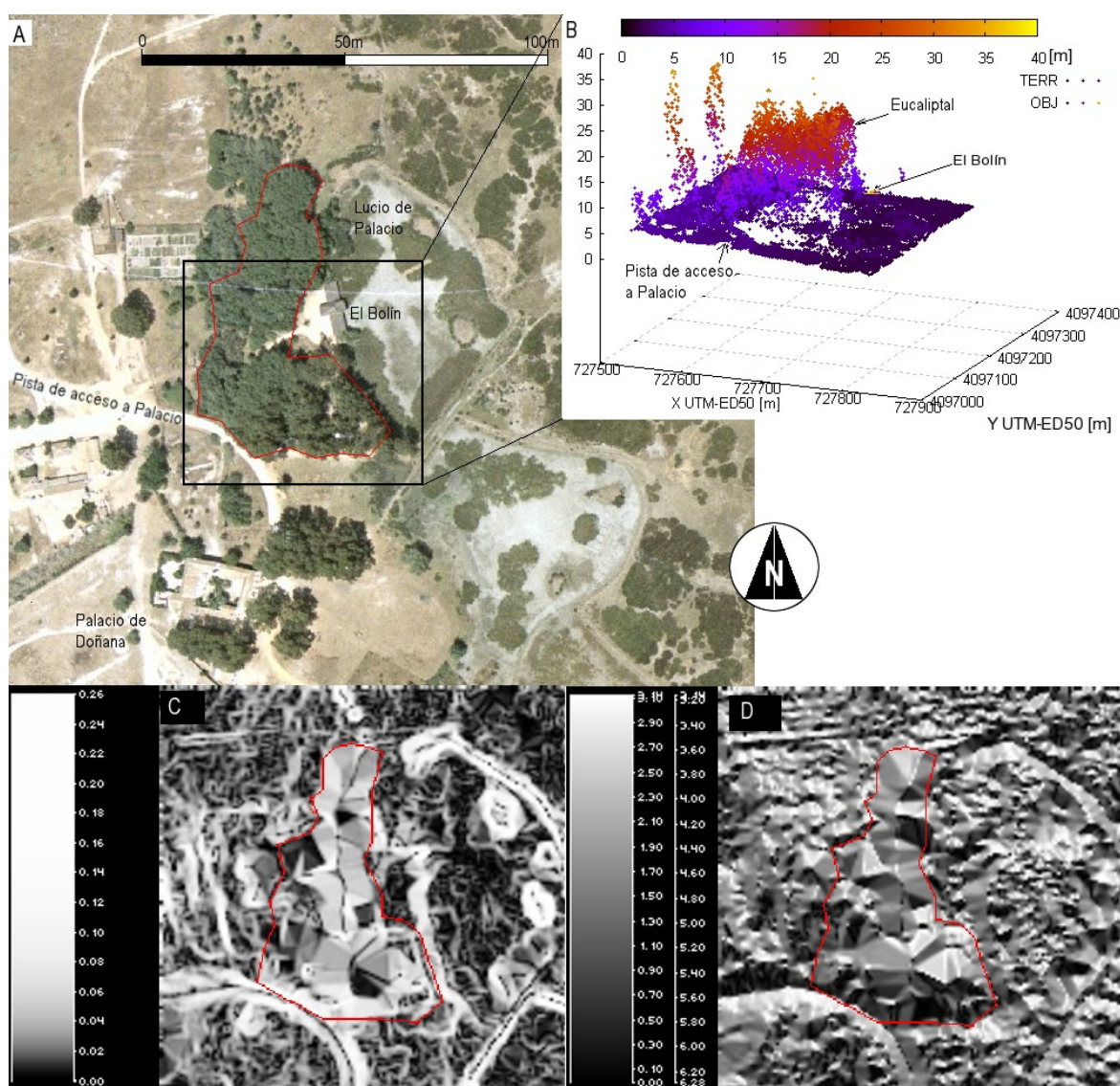


Figura 5.42. MDT resultante en un área con baja densidad de puntos debido a masas boscosas densas. **A:** Ortofotografía del eucaliptal en que se centra la figura. **B:** Representación 3D de la nube de puntos con el color según su elevación. **C:** Modelo Digital de Pendientes calculado a partir del MDT con una ampliación de contraste (pendientes en radianes). **D:** Modelo Digital de Orientaciones (orientaciones en radianes). Cartografía base: ortofotografía y MDT *LiDAR*. Proyección UTM, huso 29N, coordenadas X e Y en metros. Datum ED50.

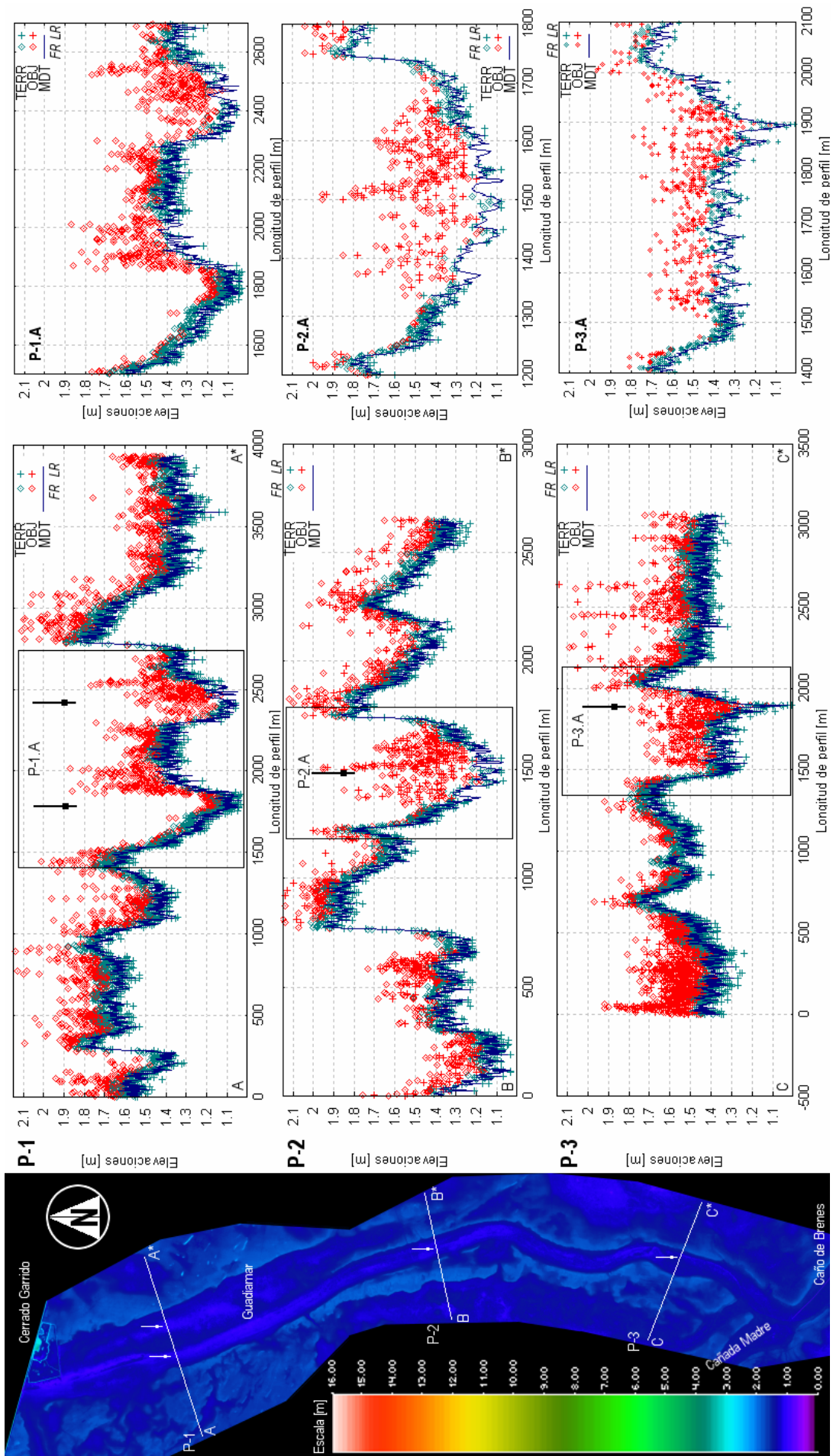


Figura 5.43. Modelo Digital del Terreno (MDT) del curso del Guadamar dentro del Parque Nacional. Se han realizado tres perfiles (P-1, P-2 y P-3) en áreas de baja densidad y penetración debido a la existencia de vegetación tipo juncos. En cada perfil se incluye el MDT en línea continua y los puntos del primer y último retorno (rombos y cruces) clasificados como terreno (TERR) y objetos (OBJ). Se ha ampliado también el cauce en cada corte (P-1.A, P-2.A y P-3.A). Las flechas verticales indican aproximadamente los puntos más bajos del cauce en cada perfil en los cortes y el MDT.

- Elementos del terreno lineales y deprimidos (caños y canales)

En el levantamiento las principales discontinuidades que se encuentran son el sistema de canales y caños que drenan algunas partes la Marisma. Aunque morfológicamente se podría pensar en la similitud entre canales y diques (una es el relieve inverso de la otra), desde el punto de vista del tratamiento de datos con *ALS* son distintos, puesto que los diques pueden ser clasificados como objetos, mientras que los canales no. Los algoritmos de clasificación presentan problemas en la preservación de los canales ya que son estructuras lineales y que suponen un cambio brusco de elevaciones (tabla 2.2). Su correcta representación se consigue cuando se insertan líneas de rotura en los bordes y en el fondo.

Esencialmente se dan dos tipos de error con los canales. El primero es un error de clasificación en los bordes de los canales “estrechos” que drenan la Marisma, y el segundo es la formación de falsas presas en los canales y en los caños (en el fondo).

Un ejemplo de **error de clasificación en los bordes** se presenta en la figura 5.44. En el corte realizado en el canal se presenta en línea continua y roja el MDT y en verde el modificado (MDT*) que es más realista. Se incluye también la nube de puntos *ALS* clasificada en terreno y objeto. Se observa que las medidas de los márgenes han sido eliminadas. Esto se debe a que el filtro clasificador se ha aplicado sin la inclusión de líneas de rotura, siendo el canal un cambio de pendiente demasiado brusco. El filtro identifica como terreno a los puntos menos elevados, eliminando así las medidas que generan un plano más inclinado que el que permiten los parámetros del filtro (flechas en figura 5.44). En el MDT se observan las facetas triangulares debido a la falta de información del terreno en los canales (1). En el área fuera del perímetro de contrato no se han generado líneas de rotura (FOTONOR [2003]) con lo que el tratamiento automático ha producido estos efectos en el modelo en todos los canales. La relación detallada de correcciones se incluye en el anejo II (epígrafes II.4 y II.5) y en versión digital en el anejo IV.

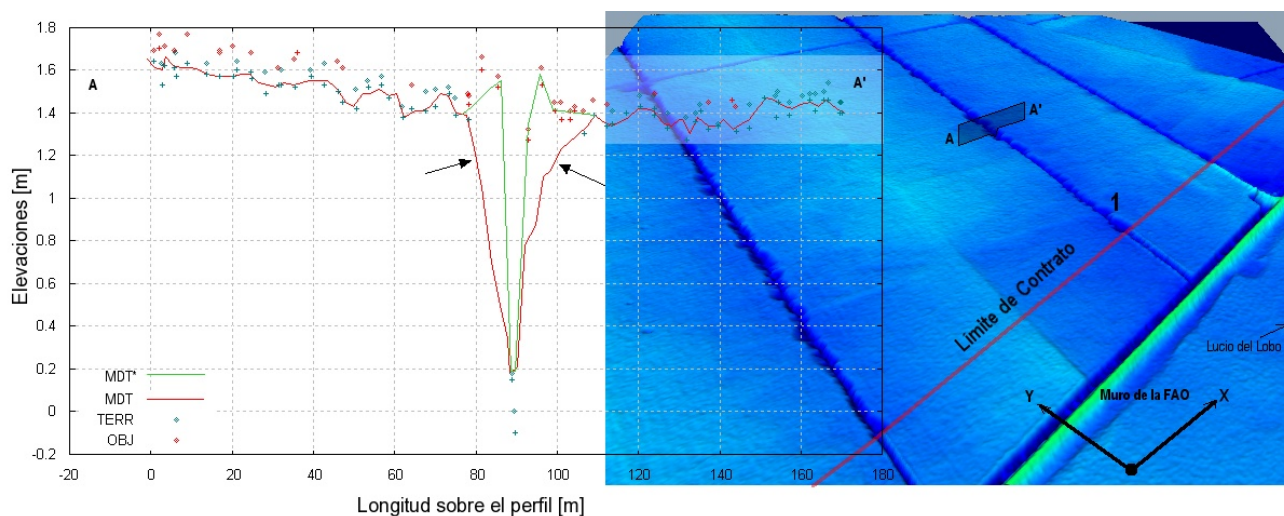


Figura 5.44. Perfil sobre un área del Parque Natural de Doñana; 600m al Norte del muro de la FAO. En el MDT (derecha) se indica en color rojo la línea del perímetro de contrato. En el perfil se presenta el Modelo Digital del Terreno original (MDT), los puntos clasificados como terreno (TERR), los puntos clasificados como objeto (OBJ) y el modelo recalculado con los puntos reclasificados (MDT*) más ajustado a la realidad de esos pequeños canales de riego y/o drenaje.

Las **falsas presas** se dan cuando la triangulación permite aristas entre las dos orillas de un canal. Se producen también, con menor elevación, en tramos donde no hay medidas en la parte más deprimida del canal y se dan triángulos que unen estos puntos a ambos lados del canal. Este fenómeno se puede producir incluso en áreas con líneas de rotura definidas. El análisis de todo el levantamiento se incluye también en los anejos II (II.4) y IV. En la figura 5.45 se presenta el caso del Caño de Brenes (drena al Guadalquivir). Se han marcado en rojo las falsas presas que se encuentran en el modelo original y comprobado que en la elaboración de dicho modelo se habían definido líneas de rotura tanto en los márgenes como en el cauce.

Para los usos habituales del modelo (por ejemplo, modelado hidráulico) el error de clasificación en los bordes no genera grandes problemas aunque el MDT resultante en estas áreas es de menor calidad. En cambio, la

formación de falsas presas pueden ser errores críticos ya que alteran el funcionamiento de la red de drenaje, especialmente en aguas bajas.

Las falsas presas se pueden detectar visualizando el MDT en tres dimensiones, pero es una tarea larga y no sistemática (sujeta a errores). En esta tesis se han aplicado las técnicas de inundación descritas en el capítulo 3 a este caso (epígrafe 5.3.2.b). Éstas han demostrado ser muy eficaces en la detección de falsas presas. Para su reparación, se modifica el MDT eliminando las presas usando las menores elevaciones de los puntos *LiDAR* del fondo del canal. Se debe considerar que algunos de los canales/caños estaban inundados (como el caso de la figura). Con la solución adoptada se asume un error (no se da el fondo real del canal) pero se han eliminado las barreras que impedían el flujo de agua en el MDT original.

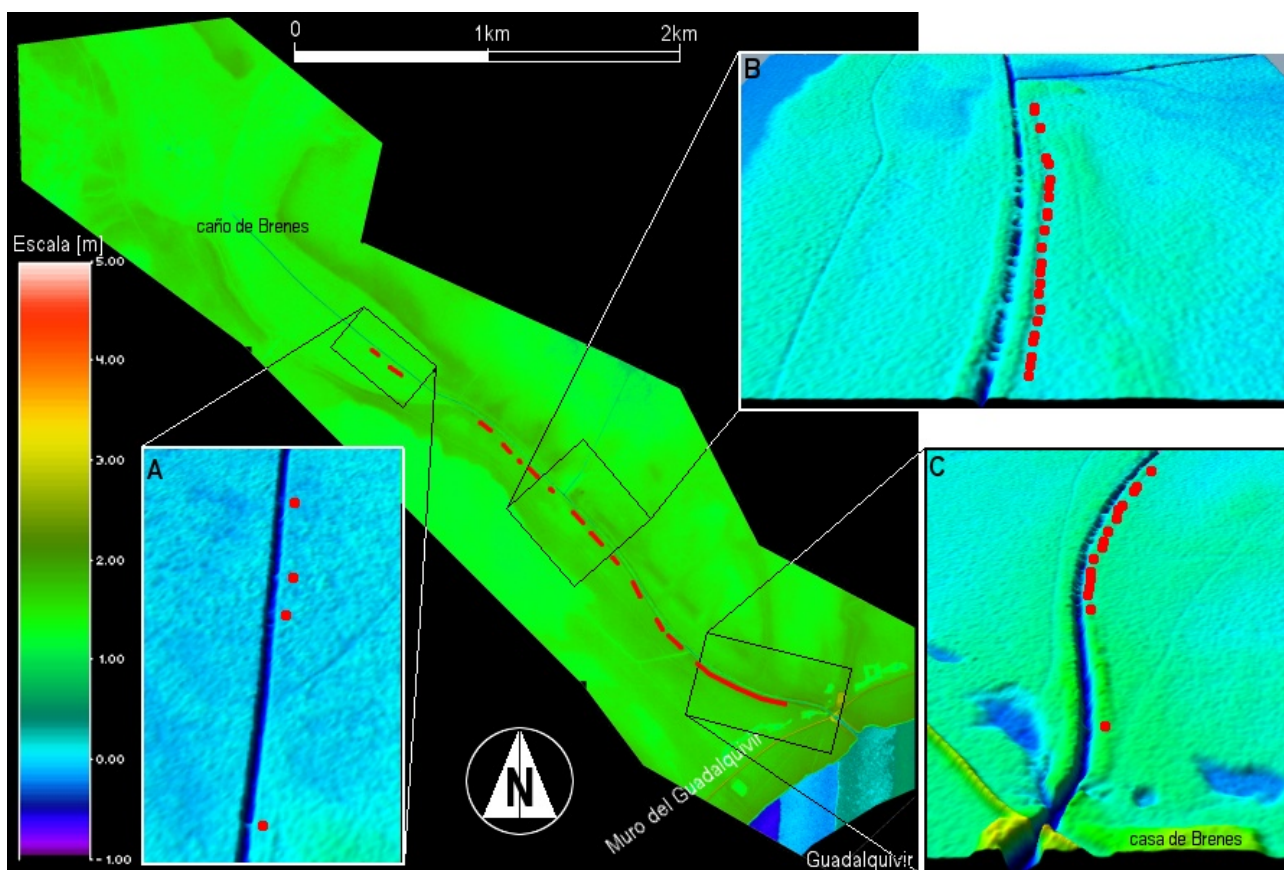


Figura 5.45. Modelo Digital del Terreno (MDT) del Caño de Brenes. Se presentan en rojo las falsas presas detectadas en el canal. Se han generado tres ampliaciones en perspectiva (A, B y C) donde se observa el efecto de esas presas en el modelo. Cartografía base: MDT *LiDAR*.

- Efecto borde

En los bordes del modelo se pueden generar errores de clasificación. La falta de información alrededor de un objeto que esté en el límite genera estos errores de clasificación. Esta falta de información engancha el objeto al terreno. El comportamiento del objeto es como el de un objeto adosado. El efecto se muestra en la figura 5.46. En esta figura se presenta un punto mal clasificado como terreno que ha modificado el modelo con una sobreelevación de 3.5m. El objeto mal clasificado es un árbol (1, subfigura 5.46.B, C). En cambio, otro árbol en la misma situación (2, subfigura 5.46.B, C) ha sido correctamente eliminado del modelo. El efecto provocado es el mismo que el de un falso punto elevado (punto 1 de este epígrafe).

La frecuencia de este tipo de error es muy baja y tiene muy poca incidencia en las aplicaciones del MDT. Una vez detectado el error su corrección se consigue mediante la edición manual de las medidas causantes del error y el recálculo del modelo en el área afectada.

Para evitar completamente estos errores en la zona de interés, se debe especificar el perímetro de la zona a levantar con un margen de seguridad amplio.

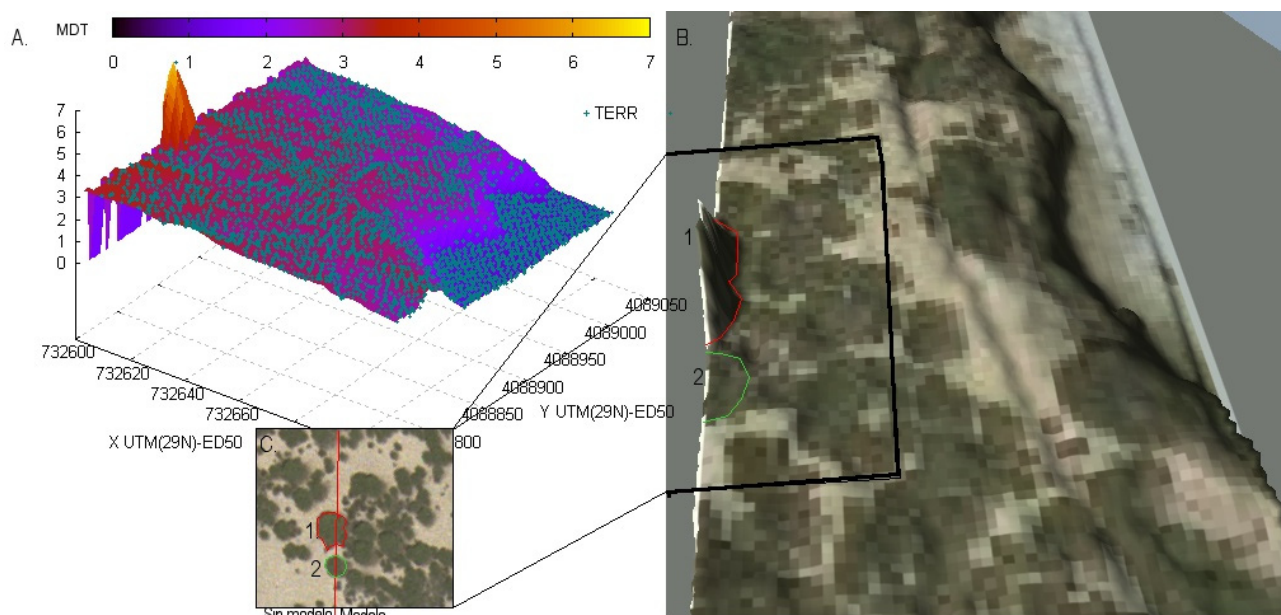


Figura 5.46. Efecto borde. **A:** Modelo Digital del Terreno con los puntos clasificados como terreno (TERR). **B:** Visión 3D del MDT con la ortofotografía fusionada. Se han marcado dos elementos 1 y 2 (explicación en el texto). **C:** Ampliación de la ortofotografía centrada en los elementos 1 y 2. Cartografía base: ortofotografía y MDT.

- Edificios

En el área del levantamiento los edificios se comportan como objetos aislados o como objetos adosados (ver definiciones en el capítulo 3). Los segundos se dan cuando se combinan con la vegetación en escenas complejas. Una primera consideración es si deben incluirse en el modelo. Tradicionalmente en un MDT estos se consideran objetos y no se incluyen en el modelo del terreno (sí en el de superficie, MDS). En cambio, las aplicaciones hidráulicas requieren todos los objetos sólidos que impidan los flujos de agua. En ese caso deberían incluirse estos elementos sólidos (edificios, muros de piedra u hormigón...) en el modelo hidráulico.

Como es habitual al generar un MDT, en el levantamiento *ALS* en Doñana se eliminaron los edificios sobre el terreno. Estos se encuentran en áreas elevadas en los márgenes de la Marisma. El único núcleo poblado es El Rocío. El resto son edificaciones aisladas (habitadas o no, entendido como tipo de edificación) que se encuentran también dentro de la Marisma en *vetas* (núcleos de arena con mayor elevación que la Marisma). En la figura 5.47 se muestra una vista de El Rocío con la nube de puntos en que se observan los puntos de los tejados aislados del terreno (izquierda), y el modelo sin estos objetos (derecha).

Los edificios han sido filtrados por el operador morfológico con la ventana de mayor tamaño del primer filtro (epígrafe 5.1.1). El tamaño de la ventana se suele fijar con el tamaño del mayor de los objetos a eliminar. Un tamaño de ventana excesivo “suaviza” demasiado el terreno y se pierde detalle en el MDT.

La mayoría de los edificios son aislados. Gracias a la falta de pendientes, sólo en configuraciones complejas con la vegetación estos edificios se adosan al terreno por lo que en general es sencilla su detección y eliminación del modelo. En la figura 5.48 se presentan dos casos de escenas complejas con edificios. En la primera (casa del guarda del Lucio del Lobo, en el “muro” de la *FAO*) la escena está compuesta por un edificio en el centro con una valla perimetral y vegetación entre estos dos elementos. En las subfiguras A y B se observa que no se han clasificado correctamente 15 puntos (del primer y último retorno). Estos han provocado la elevación en el modelo que se muestra en la figura. Esta área se encuentra al límite del área de contrato y por esa razón el proceso de clasificación y generación del modelo no ha tenido un control manual.

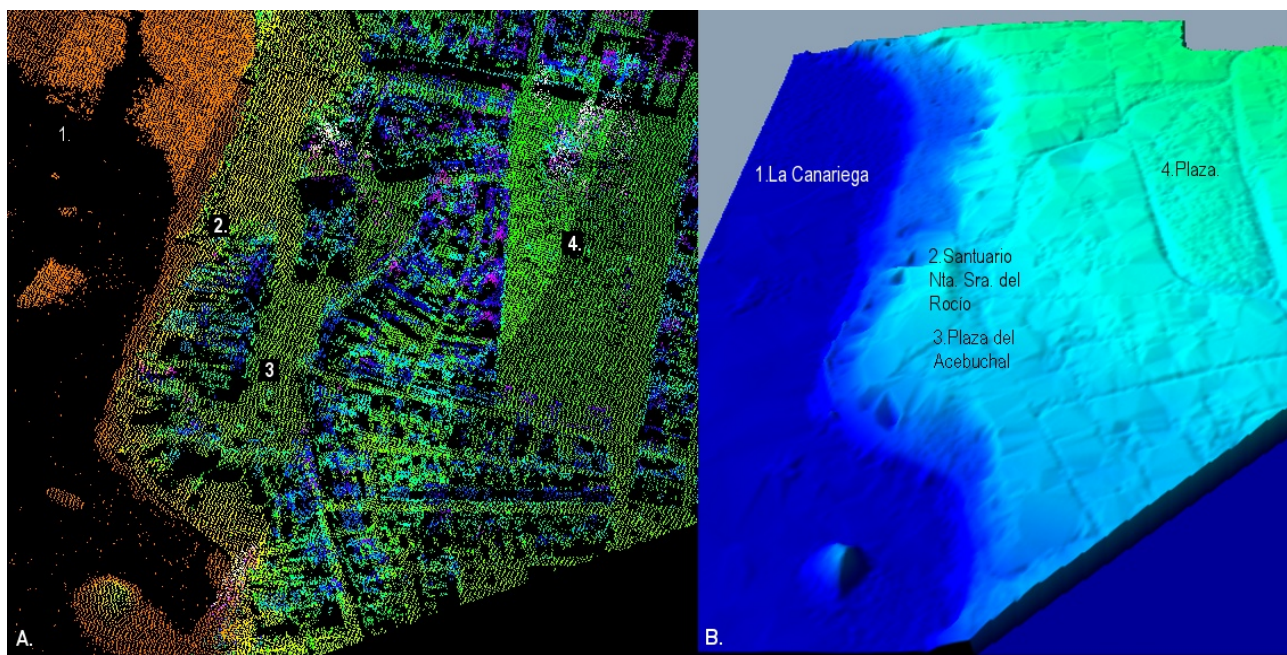


Figura 5.47. Vista del poblado de El Rocío, ejemplo de edificios aislados del terreno. **A:** Nube de puntos coloreados según su elevación. **B:** MDT del área con los edificios y otros objetos eliminados del modelo. Se han indicado cuatro zonas características en las dos vistas 3D.

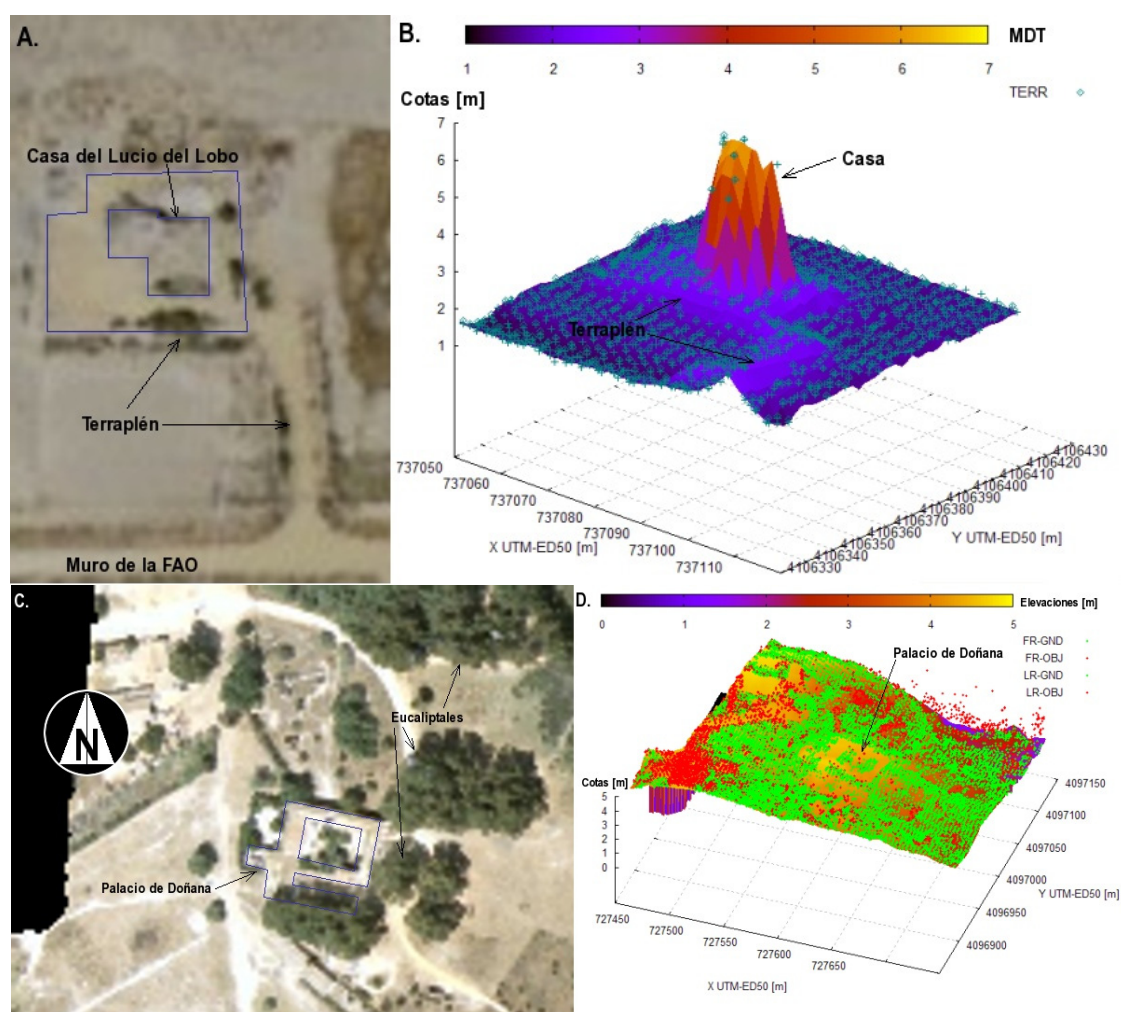


Figura 5.48. Dos ejemplos de escenas complejas con edificios y vegetación. El primero es la casa del Lucio del Lobo (A y B) y el segundo el Palacio de Doñana (C y D). A la izquierda de presenta la ortofotografía con los edificios delimitados y a la derecha el MDT con la nube de puntos clasificada superpuesta. Cartografía base: ortofotografía y MDT *LiDAR*. Proyección *UTM*, huso 29N, coordenadas *X* e *Y* en metros. Datum *ED50*.

La segunda escena compleja (Palacio de Doñana, C y D figura 5.48) la componen un edificio con patio interior rodeado por vegetación de alto porte y densidad. En este caso, los puntos que han impactado sobre el edificio han sido clasificados correctamente y no se ha introducido ningún artefacto en el MDT. Ésta área está dentro del perímetro de contrato y ha pasado por el proceso de edición manual.

La primera escena no ha sido sometida a edición manual por estar fuera del perímetro de contrato (subfigura 5.48.A). Los puntos del centro del edificio son los que se han clasificado como terreno. Esto hace pensar que el tamaño de ventana máximo usado en el filtro de clasificación no ha sido suficiente.

Dada la escasa presencia de ambientes urbanos o masas boscosas densas no hay en el modelo áreas significativas con configuraciones complejas de edificios, vegetación y/o con terreno desconectado dentro de los edificios, que son situaciones fuente de errores de clasificación.

5.3.1.5. Artefactos en el MDT debido a errores del sistema *ALS*

Este error se debe a pérdidas durante la adquisición y/o grabación del *GPS/INS* o a un error excesivo en la solución de la trayectoria de la plataforma. Producen áreas vacías o con puntos erróneos como los de la figura 5.49. Si no son detectados producen artefactos en el MDT. Son áreas que deben por tanto ser localizadas e inspeccionadas.

Ya se han presentado los efectos que pueden tener en el modelo si se producen en un área sensible como la de la figura 5.38. En cambio si se producen en un área llana el artefacto introducido no es tan trascendental. Se ha observado que antes o después de la pérdida de puntos hay algunos que se conservan con un error mayor. Esto se debe a que las tolerancias para procesar una medida láser y obtener sus coordenadas usando la ecuación general del láser (E.2.4), no han sido suficientemente restrictivas. Si este error los sitúa por debajo del terreno real el filtro de clasificación de la nube de puntos los preserva, pasando a ser falsos puntos bajos agrupados. Ésta es la causa de que incluso en áreas llanas y con solape se encuentren estos artefactos en el modelo. En la figura 5.49 se presenta un artefacto del modelo en el Lucio de los Ánsares. En el corte A-B se observa que en el artefacto hay puntos con cotas entre 0.55m y 0.70m mientras que en el Lucio la elevación menor es de 0.8m. Estas diferencias no son posibles de forma natural en un lucio (Mintegui y Robredo [2001]).

Cerca del artefacto algunos puntos se preservan pero tienen un error mayor y afectan al modelo, como ya se ha comentado. Estos falsos puntos bajos afectan al modelo incluso en las áreas de solape. En la figura 5.50 se presenta un área del Caño Travieso con un solape lateral y una pasada transversal. En este caso el fallo del sistema *GPS/INS* se ha producido en la pasada transversal y ha afectado al MDT. Se presenta un corte sobre los pequeños artefactos creados (1, 2 y 3) y se observa la presencia de falsos puntos bajos. El aspecto en el MDT es de zanjas, ya que los puntos se alinean con la forma de escaneado del sensor láser (Z en este caso, ver el espejo oscilante en la figura 2.14).

La reparación de estos errores requiere la edición manual para eliminar los puntos afectados y el recálculo del modelo en las áreas dañadas. Aunque si no se produce en áreas sensibles para la definición del modelo (diques) sólo tienen un efecto local.

La identificación manual de estos artefactos se puede realizar directamente sobre el modelo y en visualizaciones 3D con las elevaciones también realizadas (útiles en áreas llanas) La detección automática de estos falsos puntos bajos es compleja. Se basa en la detección de elementos lineales perpendiculares (con una tolerancia angular) a la dirección de vuelo y la comparación con las líneas de solape para ver si encajan con los límites de los artefactos. Los resultados de este análisis se presentan en el capítulo 6 y son otra aportación de esta tesis.

El conjunto de los errores encontrados en todo el levantamiento se presentan en el epígrafe 6.1.3 (figura 6.5) y los anejos II y IV.

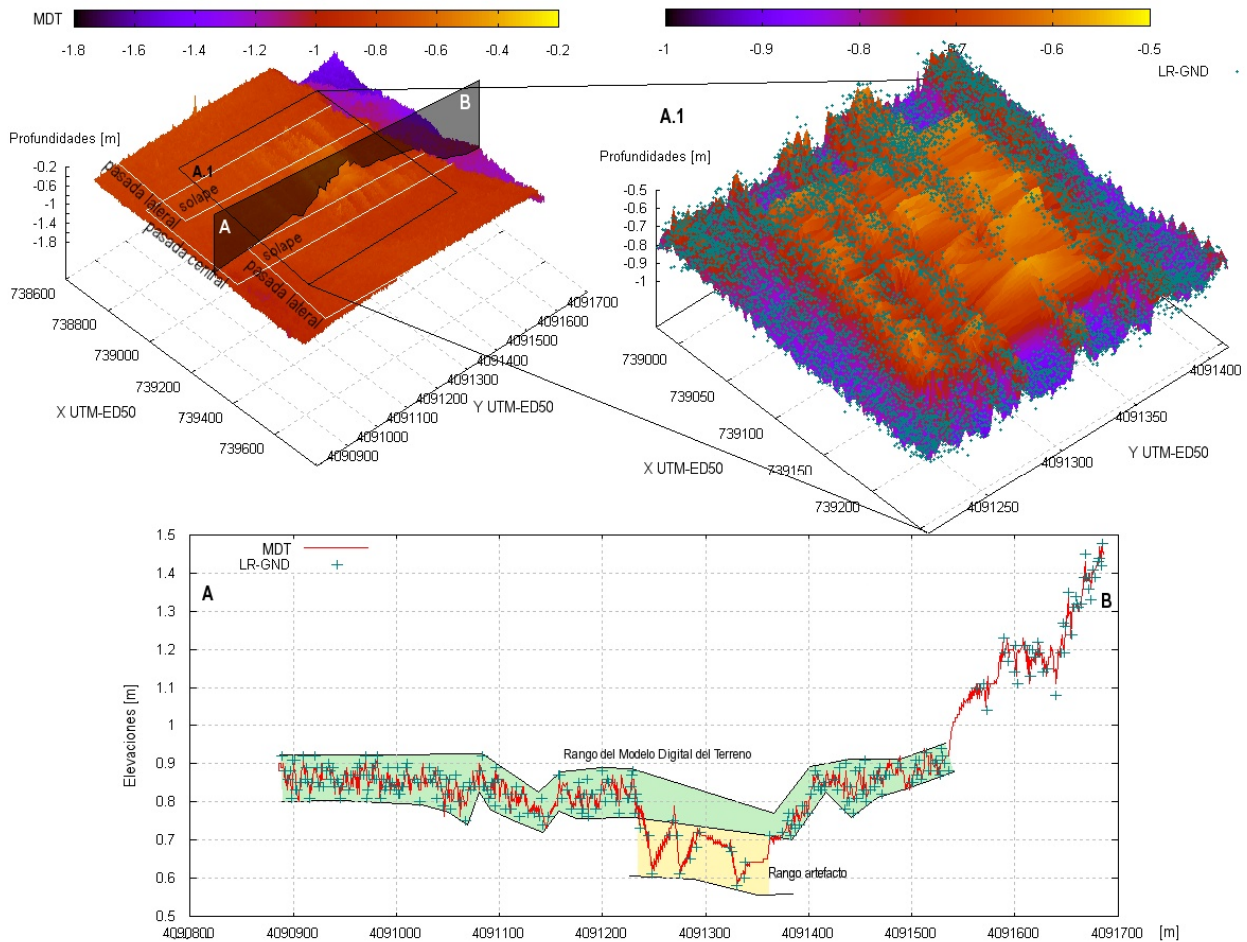


Figura 5.49. Artefacto en el centro del Lucio de los Ánsares. En la subfigura superior izquierda se presenta el MDT invertido, con las pasadas que lo han generado con su solape. Se presenta una ampliación (A.1) y un corte (A-B). En la ampliación A.1 se han superpuesto los puntos del último retorno clasificados como terreno (LR-GND). El corte resalta el rango de elevaciones aceptable en la Laguna y las del artefacto. Proyección UTM, huso 29N, coordenadas X e Y en metros. Datum ED50.

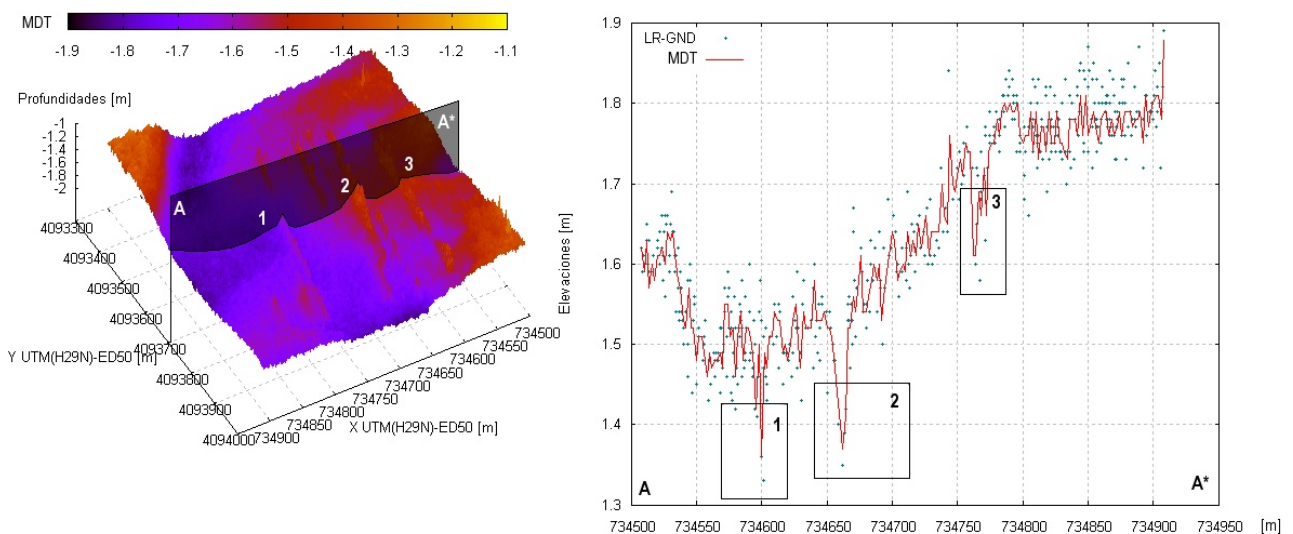


Figura 5.50. Detalle en la parte baja del Caño Travieso. A la izquierda se presenta el MDT invertido con los errores GPS/INS ("zanjas") y a la derecha una sección con los tres artefactos que corta (1, 2 y 3). Proyección UTM, huso 29N, coordenadas X e Y en metros. Datum ED50.

5.3.2. Comprobaciones específicas

Estas comprobaciones adicionales deben realizarse según la aplicación y los requerimientos que va a tener el MDE, como ya se apuntó en el capítulo 3. En este caso la aplicación principal del modelo es la hidráulica superficial, como ya se ha mencionado anteriormente. Estas técnicas (epígrafe 3.3.2) se han desarrollado para esta tesis y han demostrado ser eficaces en áreas como la analizada. Se han agrupado en: a) Ensayos de inundación; b) Control de diques y compuertas; c) Evaluación del error local en zonas planas.

Esencialmente las comprobaciones realizadas son la implementación de ensayos de inundación simples para el control del sistema de diques y compuertas que controlan los flujos de agua en la Marisma. También se han usado para la comprobación sistemática de cauces y para determinar la calidad relativa del MDT. El último apartado (c) de este epígrafe es el único que no usa los métodos de inundación descritos en el capítulo 3.

Los análisis de inundación que se han implementado son muy simples. Como se ha explicado detalladamente en el epígrafe 3.3.2, todos ellos son en régimen permanente y no consideran el tiempo.

a) Ensayos de inundación

El objetivo de estos análisis es determinar la calidad del MDT. Los dos métodos propuestos en el capítulo 3 han permitido alcanzar ese objetivo. Las comprobaciones cualitativas implementadas han permitido determinar de forma semiautomática la coherencia del MDT con la realidad. El conocimiento del terreno es básico para detectar errores con estos métodos.

Este tipo de comprobaciones permiten, además de las aplicaciones ya presentas, detectar artefactos en los cauces del modelo (falsas presas, sobre-elevaciones inexistentes,...), y estimar las máximas compensaciones altimétricas en el proceso de ajuste de las tiras del levantamiento. En epígrafes anteriores de este capítulo se ha presentado ya el uso de ensayos de inundación para comprobaciones de tipo genérico del MDT: en la detección de áreas no cubiertas (epígrafe 5.3.1.1), comprobación de cauces y lagunas (5.3.1.3), comprobación del sistema de diques y compuertas (epígrafe 5.3.1.4), y detección de artefactos en canales como las falsas presas (epígrafe 5.3.1.4). En este epígrafe se presenta cómo se han aplicado los ensayos de inundación a dos comprobaciones específicas en concreto: la detección semiautomática de artefactos (sobre todo en cauces) y la estimación de los valores de ajuste de las tiras de levantamiento.

Antecedentes a este tipo de comprobaciones se encuentran en Jenson y Domingue [1988] donde se determina de forma automática la red de drenaje, que puede ser comparada con la real. Los análisis aquí propuestos son más simples y más apropiados para el área estudiada donde una variación de 5cm en elevaciones en el cauce obtenido lo puede desplazar algún centenar de metros.

Esencialmente se han implementado dos tipos de ensayos de inundación (explicados en el epígrafe 3.3.2). El primero (“inundación equicota”) considera inundados todos los nodos con cota inferior a la de cálculo. El segundo (“contorno activo”) inunda a partir de un punto según un contorno para una cota de inundación dada. En ambos se pueden definir líneas de rebase (epígrafe 3.3.2) para parar el ensayo de inundación e inyecciones en los bordes. Los dos métodos se han aplicado a casi todas las comprobaciones que ya se han presentado. En este epígrafe se presentan algunos resultados de la detección de artefactos (principalmente en los cauces) y la evaluación de la calidad del proceso de homogenización. Como se mostrará a continuación estos ensayos han demostrado ser una potente herramienta para verificar cualitativamente la calidad del MDT sistemáticamente. Los ensayos de inundación aplicados a toda la Marisma se incluyen en los anejos II y IV. Se incluyen dos análisis, un primero usando la “inundación equicota” y un segundo con un contorno activo. Para el primero se incluye la curva de superficie inundada y volumen en el anejo II; las imágenes en el anejo digital IV. El segundo análisis tiene los puntos de inyección en las compuertas de la Montaña del Río (dique que cierra la Marisma al Guadalquivir). Los resultados se presentan en el anejo IV. Este segundo análisis ha permitido localizar artefactos en toda la Marisma.

Obviamente, las imágenes del estado de la inundación obtenidas con estos ensayos y las curvas de superficie inundada y volumen acumulado no son realistas. Sólo si todas las masas de agua están conectadas se asemeja a la realidad. Esto sólo se da en la Marisma en condiciones de aguas altas. Más información de estos análisis se presentan en Ibáñez *et al.* [2007] y Ibáñez [2007].

• Detección de artefactos

En este apartado se muestra una de las aplicaciones de los métodos de inundación implementados; la detección de falsas presas. En la figura 5.51 se presenta un ejemplo sobre la detección de artefactos en canales. Se trata del Caño de Brenes, ya tratado en la figura 5.45. Se ha usado el método del contorno activo ya comentado, con un punto de inundación en la base de la compuerta de Brenes. Con este procedimiento se han detectado las falsas presas ya expuestas en el epígrafe 5.3.1.4.

En un primer análisis se ha usado el MDT original usando un incremento de cota de inundación de 1cm (A en la figura 5.51). Se han presentado dos estados de inundación (A.1 y A.2). Se aprecian dos saltos marcados en el gráfico de las curvas de inundación (subfigura A.3). El segundo salto (A.2) se debe a una falsa presa en el cauce, que hace que al alcanzar la cota 1.59m se inunde de súbitamente el área restante.

En el segundo análisis se ha corregido el Modelo Digital del Terreno en el cauce del canal (B en la figura 5.51). Para corregirlo se ha determinado el área inundada en la ortofotografía durante el levantamiento. Se ha localizado el punto del último retorno con elevación mínima dentro del área inundada (0.39m). Al Modelo Digital del Terreno modificado en esta área y en las falsas presas detectadas se le ha asignado una cota de 0.40m. En la figura 5.51 se presenta la curva de inundación para este análisis (B.4), en la que no se aprecian saltos ni tramos con comportamientos extraños una vez se inunda la base del caño. A cota 0.4m (B.1) se inunda el canal y casi no aumenta en superficie hasta rebasar la cota 1m. El comportamiento del volumen es el correcto ya que tiende a una recta cuando la superficie es constante. En la cota 1.02m (B.2) se inunda un canal lateral que la propaga hasta el Lucio del Rey. Y en la cota 1.26m (B.3) el nivel de agua rebosa del caño por el Ojo del Juncabalejo e inunda la Marisma gradualmente hasta los 1.43m, sin poder ya inundar más elementos (en el modelo de la figura).

Se ha extendido esta metodología a la Marisma del Parque Nacional y Natural. Las falsas presas detectadas que modifican los cauces se han corregido aplicando la metodología expuesta en el párrafo anterior y se presentarán en la figura 6.5. Los cambios aplicados se han comprobado con la misma metodología para asegurar un funcionamiento correcto de la red de caños que drenan la Marisma.

Así, para la detección de estos problemas se combina la distribución espacial de la superficie inundada y el volumen almacenado con la información de la zona. Esta información puede proceder de un conocimiento adquirido en trabajo de campo, o de información obtenida por sensores remotos independientes al *ALS* (como en Martí *et al.* [2007]).

En la figura 5.52 se presenta el análisis del artefacto detectado en el epígrafe 5.3.1.2 (pg.104). Este artefacto ya se ha presentado en las figuras de densidad y penetración (B.1, figuras 5.23 y 5.24), se ha mostrado su vegetación en la figura 5.25 (B.1), en 3D en la figura 5.26, y una sección en la figura 5.27 y en la figura 5.43. El área analizada en la figura 5.52 es mayor que la de las subfiguras 5.23.B.1, 5.24.B.1, 5.25.B.1 y la figura 5.26 que se centra en el área cercana al muro de la *FAO*. A la izquierda se muestra la ortofotografía en las fechas del levantamiento *ALS*, con las áreas inundadas marcadas. A la derecha (A, B y C) tres estados del proceso de inundación (1.09m, 1.10m y 1.16m). El objetivo del ensayo es determinar si el agua fluye de forma “normal” por el Caño Guadamar con la influencia del artefacto detectado. En el epígrafe 5.3.1.2 ya se ha especulado sobre su origen (error del *LiDAR* o una elevación real), determinando que aunque para su correcta definición es necesario trabajo adicional de campo, probablemente son acumulaciones reales ya que se dan a lo largo de una valla de dirección aproximada Norte-Sur. El ensayo se ha realizado con el método ya presentado del contorno activo (capítulo 3) definiendo un punto de inyección en la parte baja del cauce del Guadamar (punto rojo en la figura). En las escenas del proceso de inundación se observa que en 1cm se inunda una gran área y con 6cm más se llega a inundar hasta la altura de la pasarela sobre el Guadamar en el muro de la *FAO* (elemento 5 en el control de diques y compuertas de este capítulo y del anejo II). Se ha marcado con una flecha la elevación que controla esta inundación repentina. Se ha considerado que el MDT en esta área es correcto, comparándolo con las áreas inundadas de la ortofotografía. Se observa también que hay al menos tres sobreelevaciones más en el cauce además de la analizada; todas en la valla (la mayor se ha presentado en el corte P1 de la figura 5.43). Así que, aunque serían necesarias comprobaciones de campo, es probable que estas sobreelevaciones se deban a sedimentación natural favorecida por los postes de la valla y la vegetación densa. Los artefactos detectados no se han modificado debido a que no alteran el curso del Caño Guadamar.

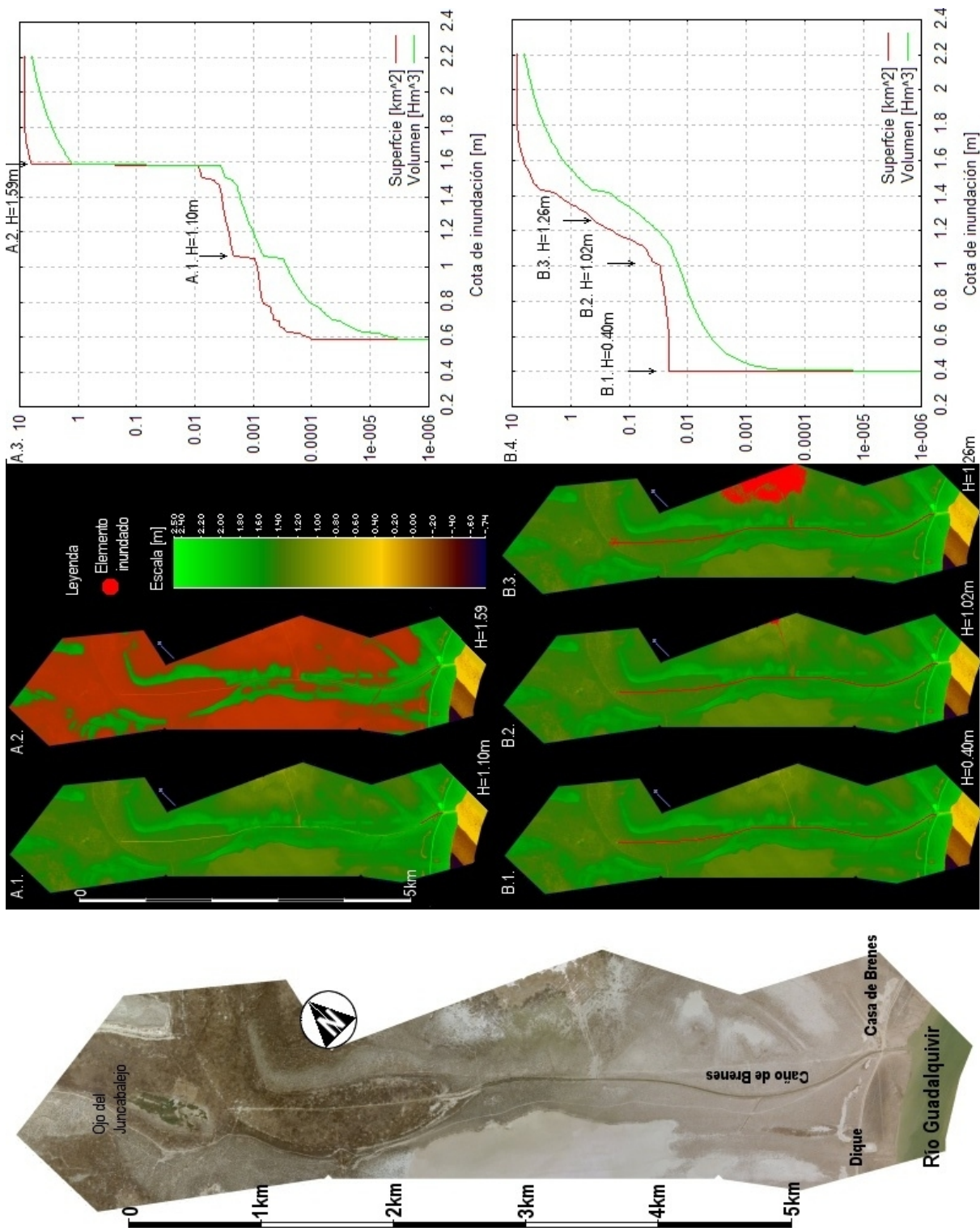


Figura 5.51. Ensayo de inundación en el Caño de Brenes. La inundación desde la compuerta en la casa de Brenes permite localizar y tratar falsas presas en el Modelo Digital del Terreno. En el primer análisis (A) se detectan las falsas presas y su cota en el modelo original. El segundo análisis (B) se ha realizado con el modelo modificado una vez eliminadas las falsas presas. Cartografía base: ortofotografía y MDT *LIDAR*.

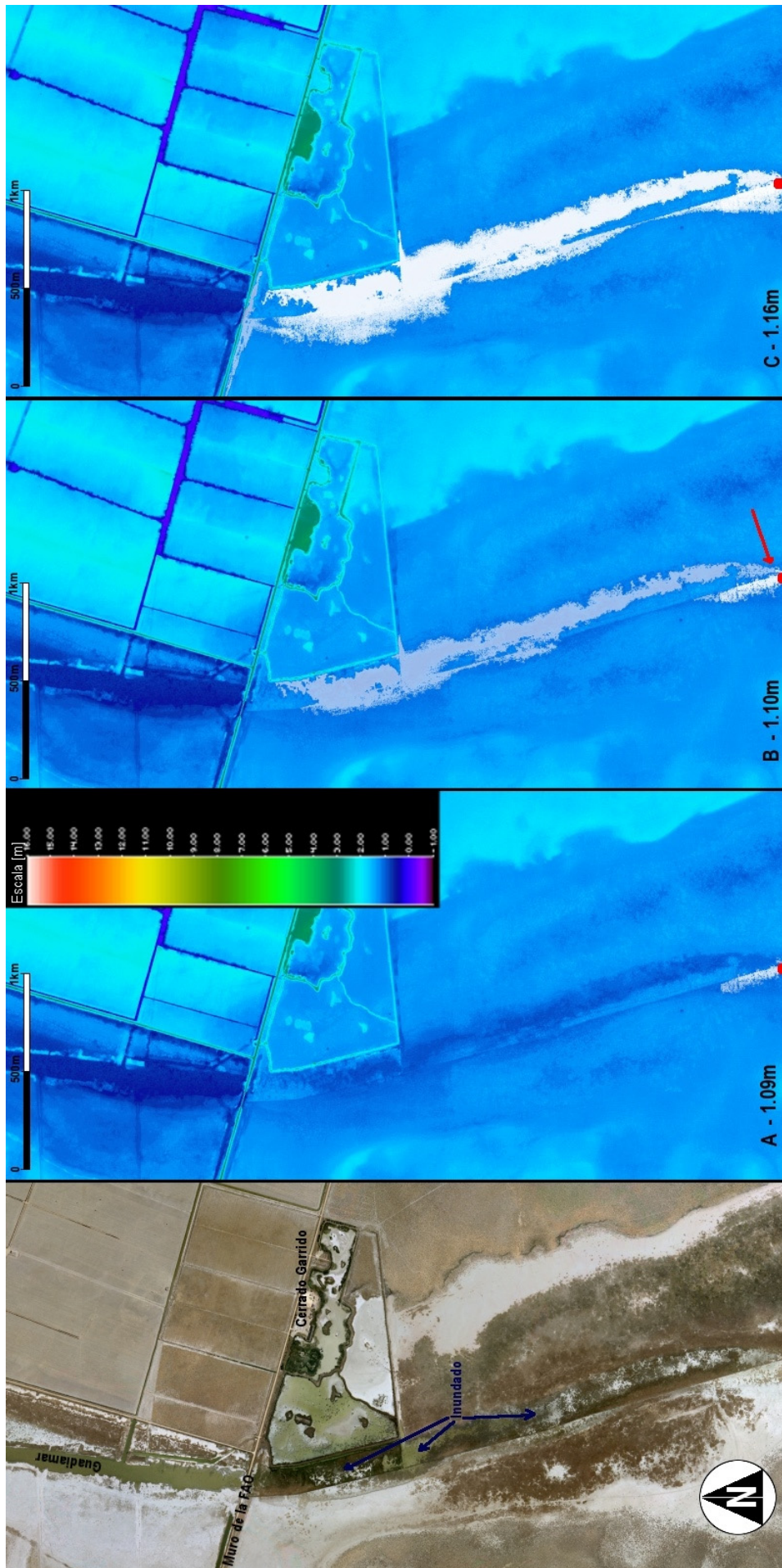


Figura 5.52. Esquema de inundación del Caño Guadamar al Sur del Cerrado Garrido. Con tres estados de inundación ($H=1.09\text{m}$, 1.10m , y 1.16m). Se ha marcado con un punto rojo el punto de inyección de agua en el modelo (flecha explicada en el texto). Cartografía base: ortofotografía y MDT *LiDAR*.

- **Estimación de los valores del ajuste de las tiras de levantamiento**

La comprobación específica que se presenta en este apartado permite visualizar la calidad altimétrica del modelo en áreas extremadamente llanas. Como se ha explicado en el capítulo 2 los MDT tienen un error asociado. Éste resulta de la composición de errores de interpolación del modelo (epígrafe 2.2.3.3) y los errores de la tecnología usada (*ALS*, epígrafes 2.2.2.3 y 2.3). Cada error se da a una escala, su distribución espacial es compleja y de difícil visualización. Pero en áreas extremadamente llanas es posible visualizar esta distribución.

El proceso de ajuste de las tiras de levantamiento (epígrafe 2.2.2.3) genera un patrón espacial característico (como el fuelle de un acordeón). En la figura 2.25 se ha mostrado cómo los errores del sistema *ALS* distorsionan un plano generando este patrón. Son deformaciones perpendiculares a las pasadas. Su dimensión es del orden de la separación entre pasadas (unos 330m). Los valores de los residuos del ajuste son en general aceptables.

La evaluación de estas ondulaciones permitiría establecer la calidad del modelo en áreas concretas con solo la información del MDT. En cualquier otro tipo de terreno este patrón de error en forma de fuelle de acordeón, de unos pocos centímetros de amplitud, queda totalmente enmascarado por el relieve del modelo. Ahora bien, si en la zona del levantamiento se dispone de áreas extremadamente suaves entonces se puede evaluar el patrón de error. Para ello “sólo” es necesario conocer la topografía con gran precisión. El caso más favorable es una topografía lineal; un plano en el espacio (como por ejemplo una pista de aeropuerto). En la Marisma del Parque Nacional de Doñana se encuentran los lucios, que son áreas extremadamente llanas (con algún centímetro de variación) y sin vegetación, siendo algunos suficientemente grandes. Entonces, aplicando un ensayo de inundación con un contorno activo, se pueden visualizar y cuantificar los residuos del proceso de homogenización de tiras.

Este ensayo ya se ha explicado en el epígrafe 3.3.2 (en la página 57) y se esquematiza en la figura 3.18. Con los tres estadios definidos (*H1* inundación base, *H2* primer rebase al cuerpo adjunto y *H3* inundación del espacio entre los dos cuerpos) se obtienen los valores máximo y mínimo de los residuos para el área analizada ($\varepsilon_{MAX}=H3-H1$ y $\varepsilon_{MIN}=H2-H1$).

En el levantamiento *ALS* de Doñana se han localizado diversas áreas donde se puede aplicar esta comprobación. Su posición se presenta en el mapa de densidad (figura 5.23; *I.1* a *I.8*). Se aprecia que son áreas con alta densidad y penetración. La primera de las zonas se muestra en la figura 5.53, donde se puede comprobar que es un área llana y sin vegetación. En las figuras 5.54 y 5.55 se presentan los ensayos de inundación en dos de estas áreas (*I1* e *I2*).

La primera se localiza en la mitad Oeste del Lucio de los Ánsares (*I.1*). La condición de horizontalidad se ha comprobado con cuatro puntos de nivelación de la red ETSIM (Mintegui y Robredo [2001]) que cruzan el Lucio de Oeste a Este (*H47* – *H48* – *H49* y *H50*). La máxima diferencia entre ellos es de 1cm. En este Lucio se encuentra un artefacto (1) que ya ha analizado en el epígrafe 5.3.1.5. En la subfigura 5.54.A se muestra el estado de la inundación a la cota *H1*=0.77m que se ha considerado la cota base del cuerpo 1. En la subfigura 5.54.B se muestra como inunda el cuerpo que tiene al Oeste (2) a cota *H2*=0.79m. En la subfigura 5.54.C se presenta el estado de la inundación a cota *H3*=0.82m. Se ha marcado con un cuadro verde el área entre los cuerpos 1 y 2 en donde se considera que se ha llegado a la sobre elevación máxima entre los dos cuerpos. También se ha inundado un tercer cuerpo desde el cuerpo central que llega a *H3* en *H*=0.84m (3 en la subfigura 5.54.C).

La segunda área de ensayo (*I.2*) se encuentra en el Lucio de Vetalengua (figura 5.55), en la que también se presentan 3 escenas. En la primera (A), a cota 0.91m, se considera que se ha llegado a la cota base del cuerpo principal (*H1*). En la escena B se presenta la situación a la cota 1.01m, momento en que se inunda el segundo cuerpo (*H2*). En la tercera escena (C) se muestra el estado de la inundación a la cota 1.07m en que casi se ha inundado todo el espacio entre los dos cuerpos (*H3*).

A la vista de los resultados, en ambas figuras se identifican perfectamente la alineación de las pasadas del vuelo *ALS* y la estructura espacial del residuo en forma de fuelle de acordeón que se ha mostrado en la figura 3.18.



Figura 5.53. Lucio de los Ánsares. En la fotografía se observa que es un área sin vegetación, sub-horizontal y sin irregularidades aparentes.

Los resultados de las 8 áreas analizadas se presentan en la tabla 5.10. Para cada zona se incluyen dos valores numéricos. El primero es el mínimo de los escalones para inundar un cuerpo adyacente en el área estudiada ($H2-H1$) y el segundo es el máximo de los escalones en el área estudiada ($H3-H1$). Ambos valores acotan el rango de variación de los residuos de los ajustes del proceso de homogenización.

Estos valores son una estimación de la calidad relativa del modelo en distintas áreas del levantamiento. Los valores obtenidos se encuentran dentro del error global cuantitativo obtenido en el epígrafe 5.2.

Tabla 5.10. Resumen de los ensayos de inundación en áreas extremadamente llanas del Parque Nacional de Doñana. Su localización se muestra en la figura 5.23.

	Zona	Intervalos de los residuos entre tiras	
		min ($H2-H1$)	max ($H3-H1$)
<i>I.1</i>	Lucio de los Ánsares	0.03m	0.07m
<i>I.2</i>	Lucio de Vetallengua	0.10m	0.16m
<i>I.3</i>	Lucio Grande de la casa de Vetallengua	0.12m	0.19m
<i>I.4</i>	Marisma de la Canariega – Boca del Lobo	0.05m	0.12m
<i>I.5</i>	Lucio del Molinillo	0.04m	0.08m
<i>I.6</i>	Lucio de Mari López	0.09m	0.12m
<i>I.7</i>	Paciles del Mal Tiempo y Cortado	0.13m	0.15m
<i>I.8</i>	Lucio Vetas Altas	0.04m	0.07m

Según el informe de FOTONOR [2003] la máxima corrección altimétrica aplicada sobre las tiras de solape es de -12cm, y el 98% de los valores son inferiores a 6cm. Se han representado los valores máximos del informe, encontrándose cerca de las áreas *I.1* y *I.5*. El análisis realizado ha permitido detectar, en el caso analizado, las zonas con mayores residuos.

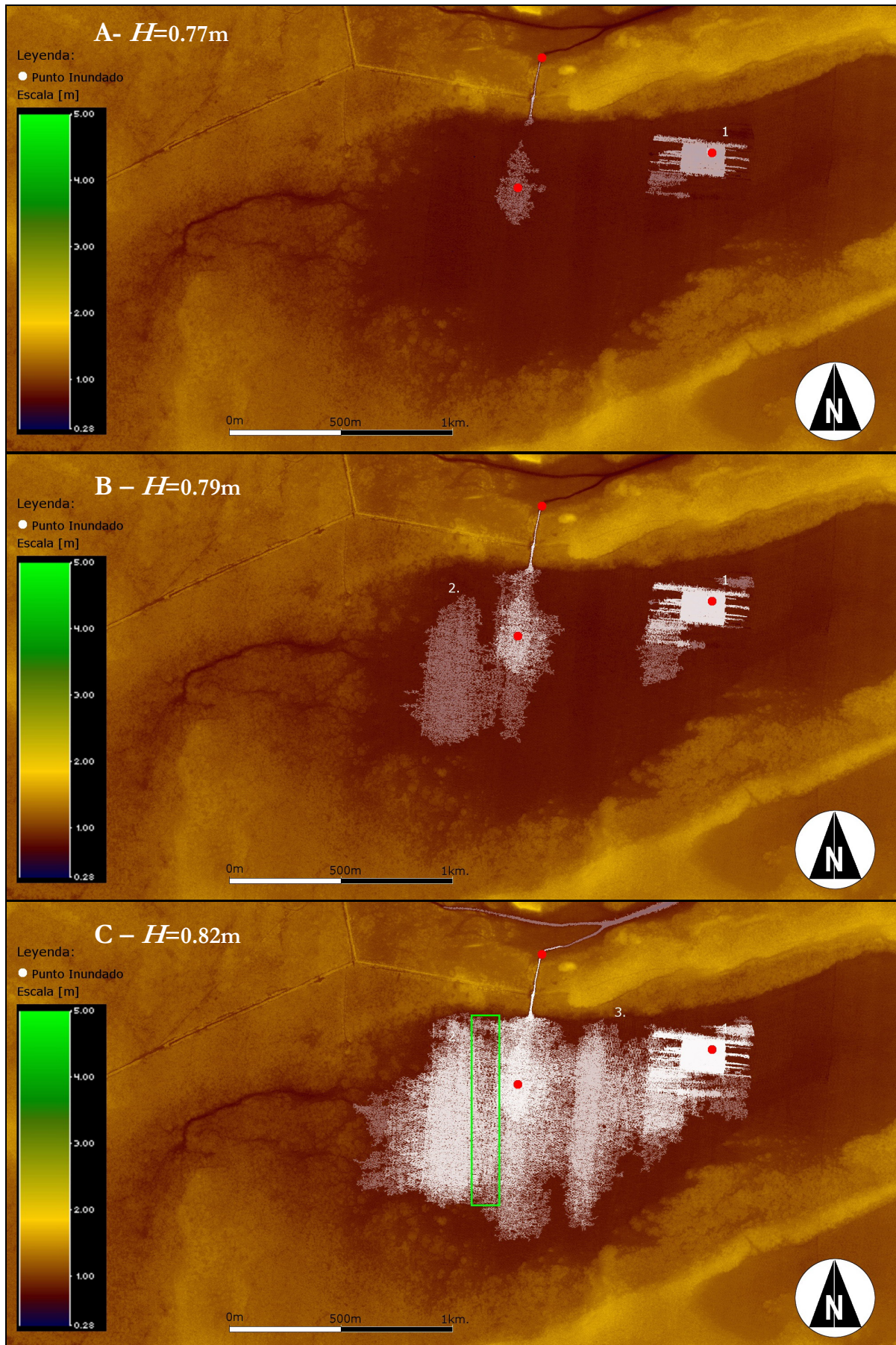


Figura 5.54. Inundación con un contorno activo desde tres puntos de inyección (en rojo) en el Lucio de los Ánsares (I.I). Se presentan las escenas a 0.77m (A), 0.79m (B) y 0.82m (C). Explicación en el texto. Cartografía base: MDT *LiDAR*.

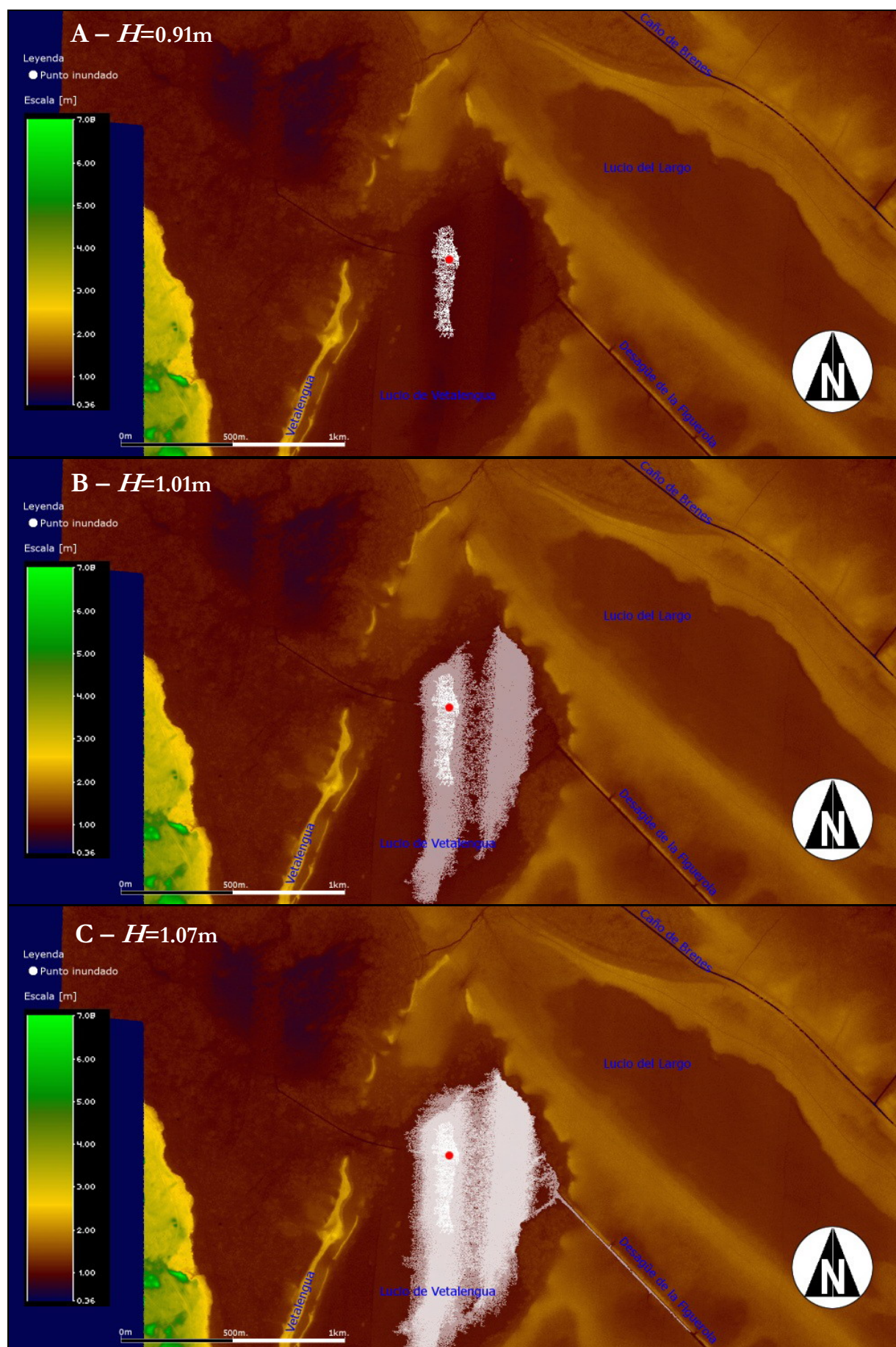


Figura 5.55. Inundación con un contorno activo con un punto de inyección (en rojo) en el Lucio de Vetalegueta (I.2). Se presentan las escenas a 0.91m (A), 1.01m (B) y 1.07m (C). Explicación en el texto. Cartografía base: MDT *LIDAR*.

b) Control de diques y compuertas

El análisis de diques y compuertas se ha concentrado en el perímetro del la Marisma del Parque Nacional, que es el área de máximo interés para los análisis hidráulicos. Como ya se ha comentado, estos elementos controlan el régimen hidráulico de la Marisma. Por ese motivo se ha dedicado una especial atención a su tratamiento.

Los diques en este caso no pueden ser tratados como en cualquier levantamiento. En un proyecto estándar se debe comprobar si se han interrumpido arbitrariamente los caminos en terraplenes (o este tipo de caminos elevados) con pasos inferiores. En un área como Doñana se debe comprobar además la correcta definición de las cotas de coronación de los diques y de las obras de fábrica que los cruzan. Sobre todo si la aplicación del MDT es hidráulica (los diques son barreras hidráulicas). Los diques ya han sido tratados como un error de clasificación (epígrafe 5.3.1.4) con ejemplos de los errores detectados (figuras 5.36 y 5.37). Pero los ensayos de inundación aplicados, desarrollados para un área como Doñana, son una técnica específica para las áreas extensas y llanas. Los ensayos permiten detectar los puntos de rebase que son analizados singularmente.

En una primera aproximación, la comprobación de la preservación de los diques se ha realizado de forma manual con la visualización en 3D del MDT con la ortofotografía fusionada. Para la visualización se ha usado en software *3DEM* (Richard [2004]). Los vuelos realizados sobre el modelo se incluyen en el anejo IV en formato de video. La preservación del sistema de diques ya se ha presentado en la figura 5.36 (en verde los preservados y en rojo los eliminados). Con los ensayos de inundación con un “contorno activo” se han comprobado las cotas de coronación de cada tramo en una segunda aproximación.

El control realizado a todo el perímetro del Parque Nacional y áreas adyacentes se presenta en la figura 5.56 con los valores y puntos de rebase en el MDT. En la ampliación B se presenta el área con el primer valor de rebase si no se corrige el modelo ($H=1.96\text{m}$ – error *GPS/INS* de la figura 5.38). Las áreas corregidas (explicadas en el epígrafe 5.3.1.4) se han remarcado en negro. El análisis con el modelo corregido da una primera cota de rebase en el área de $H=2.89\text{m}$. Es decir, la zona del Caño del Buen Tiro deja de ser la crítica para el rebase de la Montaña del Río. En la ampliación A (figura 5.56) se presentan los puntos de rebase mínimos en el perímetro del Parque Nacional con el MDT ya corregido. En las ampliaciones A.1 y A.2 se observan los puntos con la cota de rebase ($H=2.18\text{-}2.20\text{m}$) y la línea de rebase en rojo (el programa de cálculo determina que hay rebase cuando se inunda un nodo en esta línea).

Se han analizado otras áreas en el levantamiento. La finca de los Caracoles, que en el momento del levantamiento *ALS* (2002) estaba aislada de la Marisma, se comunicaría con esta, según el MDT, cuando la altura del agua alcanzara $H=2.05\text{m}$ por el Caño Travieso.

En el Parque Natural el “muro” que divide la Marisma Gallega aislando el Guadiamar de su margen izquierda (Los Garridos) rebosa a una cota $H=2.43\text{m}$ (el punto se ha marcado en la figura y la ampliación C).

Por último se ha analizado el área de Entremuros. El dique que la cierra al Brazo de la Torre (sin considerar el encauzamiento) rebosa a una altura de 1.60m . Sus muros laterales rebosan a $H=2.82\text{m}$.

Por lo que respecta a las compuertas, éstas han sido objeto de comprobaciones genéricas parciales como zonas de sombra (5.3.1.4). Las comprobaciones específicas completas del sistema de compuertas se detallan en el anejo II. Se han analizado las que encierran el perímetro del Parque Nacional y se han encontrado 18 elementos en este perímetro (figura 5.57), de los cuales cuatro no están en funcionamiento.

Las compuertas se ha considerado que se han tratado correctamente si se han mantenido cerradas. En caso que la compuerta pueda rebosar (caso A, figura 5.40) se ha preservado la cota máxima del paramento. De este modo en los ensayos de inundación aplicados en esta tesis el agua no se “escaparía” por estos. Posteriormente, en un modelado hidráulico completo (en un entorno de programación de elementos o diferencias finitas) se puede o no permitir la apertura de la compuerta como una condición de contorno/inicial entre nodos de la malla.



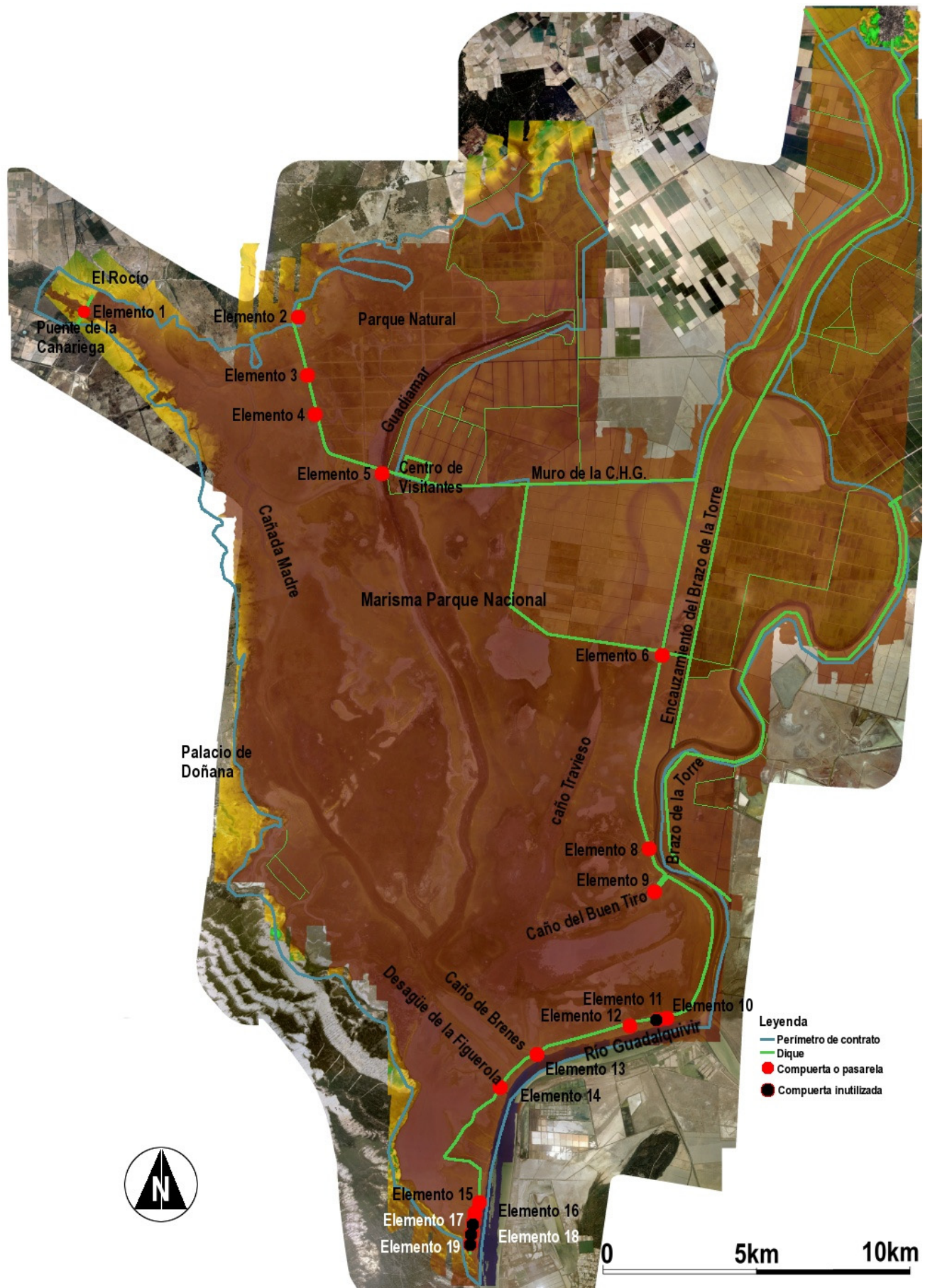


Figura 5.57. Doñana: elementos (compuertas/pasarelas) que cierran las áreas del levantamiento. Se han incluido las que controlan la Marisma del Parque Nacional. Cartografía base: ortofotografía y MDT *LiDAR*.

Se distinguen dos tipos de errores. El primero se da cuando el elemento incluido / eliminado del MDT con un tratamiento correcto debería haber sido tratado de forma contraria. El segundo, cuando el elemento no tiene la cota correcta. El primer error es crítico ya que modifica por completo los resultados de un estudio de inundaciones. Abre pasos que en realidad están cerrados, y cierra otros que están abiertos. El segundo error es menos crítico ya que cambia la cota en que se rebasa el elemento pero no la dirección de los flujos de agua.

Como ejemplo del primer error, en la figura 5.58 se presenta el elemento 1. Éste es el puente de la Canariega, en la carretera de Matalascañas. Se han distinguido dos subelementos: el 01 es el puente, que debería haber sido eliminado del modelo ya que no impide el paso de las aguas del arroyo de la Rocina aguas abajo; el 02 es un badén con dos compuertas que permiten el paso del Arroyo sin que rebasa por encima del badén. Se ha determinado la cota superior del badén con precisión a partir del vértice VP1 del Proyecto MADRE. La cota de la solera del badén es de 2.7m. El funcionamiento hidráulico del MDT original y del mejorado es completamente distinto en el entorno de este elemento.

Como ejemplo del segundo tipo de error, en la parte superior de la figura 5.56 se presenta un elemento con la cota de rebase mal introducida (ampliación C). Como se puede consultar en la tabla II.2 (anejo II) el elemento 5 está compuesto por dos pasos inferiores, uno con una losa de hormigón y otro con tubos de hormigón. La cota original de rebase era $H=1.92\text{m}$, la corrección del MDT introduce unas cotas de rebase para los subelementos 01 y 02 de 1.463m y 1.260m.

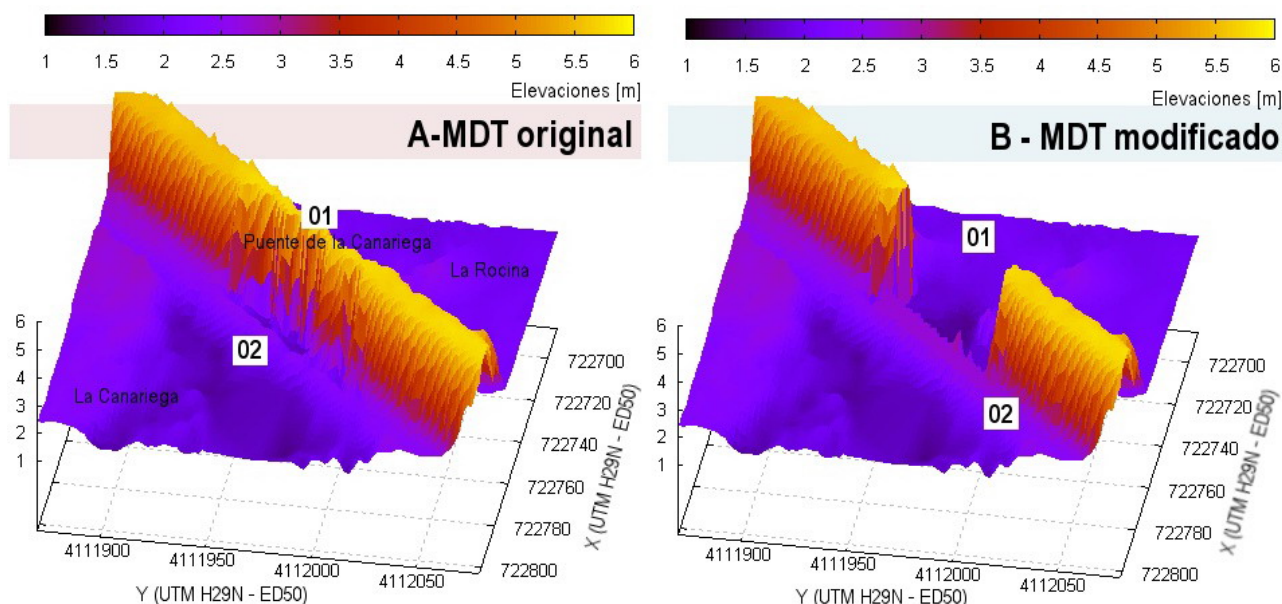


Figura 5.58. Modelo Digital del Terreno en el puente de la Canariega, que da acceso a El Rocío. Se incluyen el modelo original a la izquierda y el modificado tras la comprobación específica de diques y compuertas (derecha). Se distinguen los dos elementos corregidos, el tablero del puente (01) y el badén (02). Coordenadas X e Y en metros.

c) Evaluación del error local en zonas planas

En este apartado se presenta un método para evaluar la calidad altimétrica del Modelo Digital del Terreno. Se usa la variabilidad local de las medidas láser en zonas localmente planas, para evaluar la precisión relativa del modelo a cortas distancias.

Se requieren áreas sub-horizontales, como podrían ser campos de fútbol, carreteras, autopistas, pistas de aeropuertos, cubiertas de naves industriales totalmente planas, o lechos secos de lagunas. Éstas se detectan a partir del mapa de pendientes del Modelo Digital del Terreno, aunque también se puede usar el conocimiento directo del terreno. Para aislar un área se han usado técnicas de tratamiento digital de imágenes. En las tres áreas analizadas (Lucio de los Ánsares, Lucio de Mari López y Lucio del Molinillo) se ha aplicado una “erosión

morfológica”³ junto con un filtro de Sobel de detección de bordes (Sobel y Feldman [1968]) sobre el Modelo Digital de Pendientes.

El tipo de terreno se ha mostrado en la figura 5.53 en la que se comprueba que los lechos secos de los Lucios son realmente llanos. A título de ejemplo en la figura 5.58 se presenta un corte de dirección Oeste-Este del MDT con los puntos clasificados como terreno (*FR*, primer retorno; *LR*, último retorno). Se han añadido dos márgenes al MDT a 10cm observándose que todas las medidas láser están en este intervalo. En la figura 5.60 se presentan los resultados para todo el Lucio. En A (*FR*) y B (*LR*) se presentan las diferencias espaciales de los puntos *ALS* con el Modelo Digital del Terreno (MDT). Estas diferencias y su dispersión caracterizan el error de las medidas *LiDAR*, siempre en función de los parámetros del filtro de clasificación de la nube de puntos que si son muy restrictivos pueden eliminar los extremos de los histogramas.

En la subfigura B se aprecia cómo en las áreas de solape (etiquetadas 2) la dispersión es mayor. Esto se debe a que aunque se ajusten dos tiras de levantamiento adyacentes siempre queda un residuo entre los dos conjuntos de puntos. En la subfigura C de la figura se presentan los histogramas de las diferencias del primer retorno (*FR*) y último retorno (*LR*). Los límites de los histogramas son respectivamente [-0.188:0.223m] y [-0.318:0.315m]. En los tres lucios analizados el rango de diferencias es mayor para el último retorno que para el primero. También se observa en las tres áreas una diferencia entre las medias de los dos pulsos entre 5 y 8cm. Así estas diferencias son explicables además de los errores de medida del *ALS* por diferencias de calibración entre los dos retornos. En cualquier, caso están dentro de los márgenes de error esperable (o habitual) del *ALS*.

Los resultados en las tres áreas se presentan en la tabla 5.11, concentrándonos ya en el último retorno restado del MDT. Se muestran los resultados totales y en función de si se encuentran en un área de solape o no. Por último, se muestra el ϵ_{RMS} al 95% de intervalo de confianza.

Tabla 5.11. Estadísticos de las diferencias de cota entre los puntos *ALS* (último retorno, *LR*) y el MDT en tres áreas llanas (lucios del P.N. de Doñana). Además los resultados con todos los puntos de cada área, se distinguen los estadísticos para los puntos en la zona central de cada pasada (1, figura 5.60.B) o en las zonas de solape entre pasadas (2, figura 5.60.B).

Área	Puntos		Número[miles]		M_{LR-MDT} [m]		σ_{LR-MDT} [m]		RMS_{LR-MDT} [m]		ϵ_{RMSZ} (95%) [m]	
Lucio de los Ánsares	totales		970		0.003		0.027		0.027		± 0.053	
	sin solape	solape	424	546	0.001	0.005	0.022	0.030	0.022	0.030	± 0.043	± 0.059
Lucio de Mari López	totales		874		0.003		0.027		0.027		± 0.054	
	sin solape	solape	354	520	0.001	0.005	0.022	0.030	0.022	0.030	± 0.043	± 0.060
Lucio del Molinillo	totales		212		0.003		0.027		0.027		± 0.053	
	sin solape	solape	87	125	0.001	0.005	0.022	0.030	0.022	0.031	± 0.042	± 0.060

Lo primero que se observa en la tabla es que los estadísticos son mucho mejores que los de anteriores comparaciones cuantitativas (puntos, áreas y perfiles). Por ejemplo, medias en los errores de unos pocos cm. (ϵ_{RMS} (95%) = 0.054m), frente a los errores del epígrafe 5.2 que rondaban entre los 15 y 20cm (ver tabla 6.1 en el siguiente capítulo). Esta situación es satisfactoria pero no debe sorprender dado que las diferencias de la tabla no son una estimación del error total del *LiDAR* sino sólo una medida de su dispersión local en un área pequeña y especialmente favorable. La medida está además en función de los parámetros del filtro de clasificación de la nube de puntos. Con criterios más restrictivos en el filtro se obtendrían, con este análisis, mejores estadísticos, pero estos no implicarían que el error total sea mejor. Como el MDT se ha obtenido a partir de los puntos del último retorno, la media de las diferencias debe tender a cero, como así ocurre. Es destacable también que entre áreas distintas de la Marisma, separadas por varios kilómetros, los resultados sean prácticamente idénticos.

La distinción entre puntos en la zona de solape y puntos en la zona central de la pasada permite comprobar que en los solapes las diferencias *LR-MDT* tienen una media de 5mm (media cero en zonas centrales) y un error de 6cm (un 40% superior que en el centro de la pasada). Si el error fuera aleatorio puro, cabría esperar que en las zonas de solape, con mayor densidad de puntos, el error fuera mejor. Sin embargo el error depende de la situación del punto dentro de la pasada. A mayor separación del centro, mayor es el error, con algunas contribuciones de tipo sistemático (figura 2.25). Además, las disparidades entre tiras después del proceso de homogenización de las pasadas del levantamiento aumentan la dispersión en las zonas de solape. Los residuos de los puntos *ALS* en relación a la superficie ajustada (MDT) son, lógicamente, mayores a lo largo de las zonas de

³ Erosión Morfológica. Véase anejo III

solape. Este hecho se ha podido visualizar de manera muy clara en los “ensayos de inundación” en los lucios (epígrafe 5.3.2.a).

El valor de error relativo de la tabla 5.11 es una medida de la “rugosidad” de los datos *ALS* y una estimación de la precisión relativa del *ALS* a corta distancia.

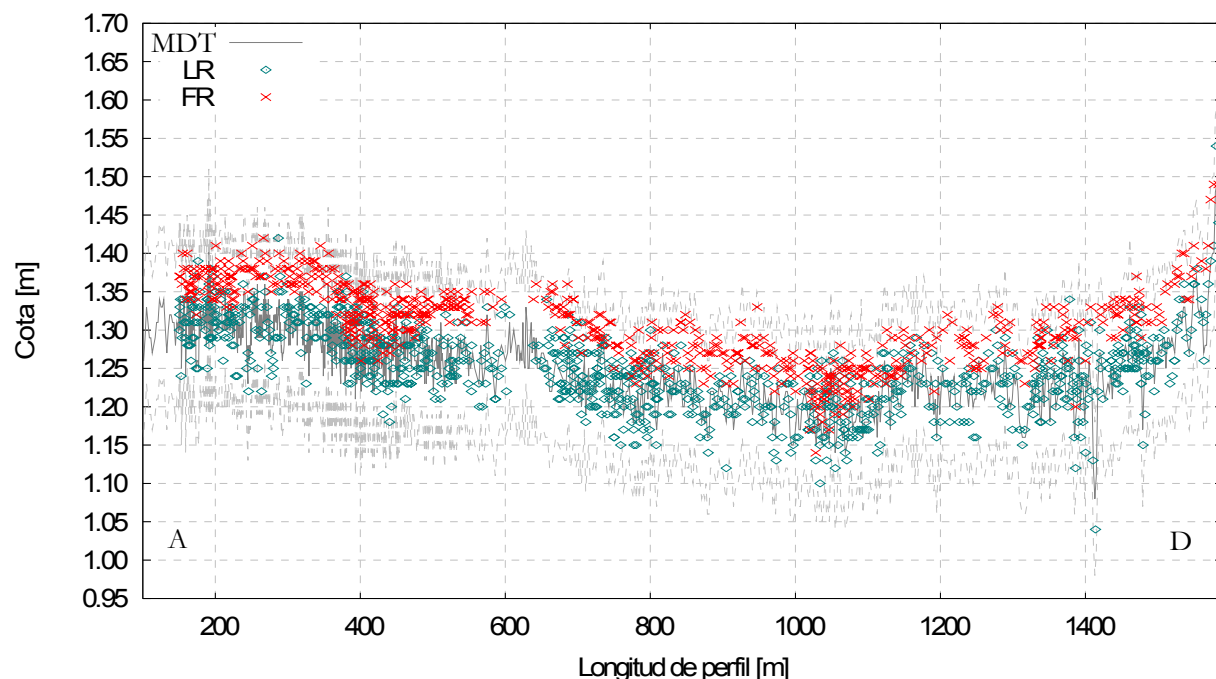


Figura 5.59. Corte en el Lucio del Molinillo de Oeste a Este con el MDT (línea continua gris) con dos límites a 10cm (superior e inferior, discontinuos), y el primer y último retorno (FR y LR). La línea de corte ABCD aparece en la figura 5.60.

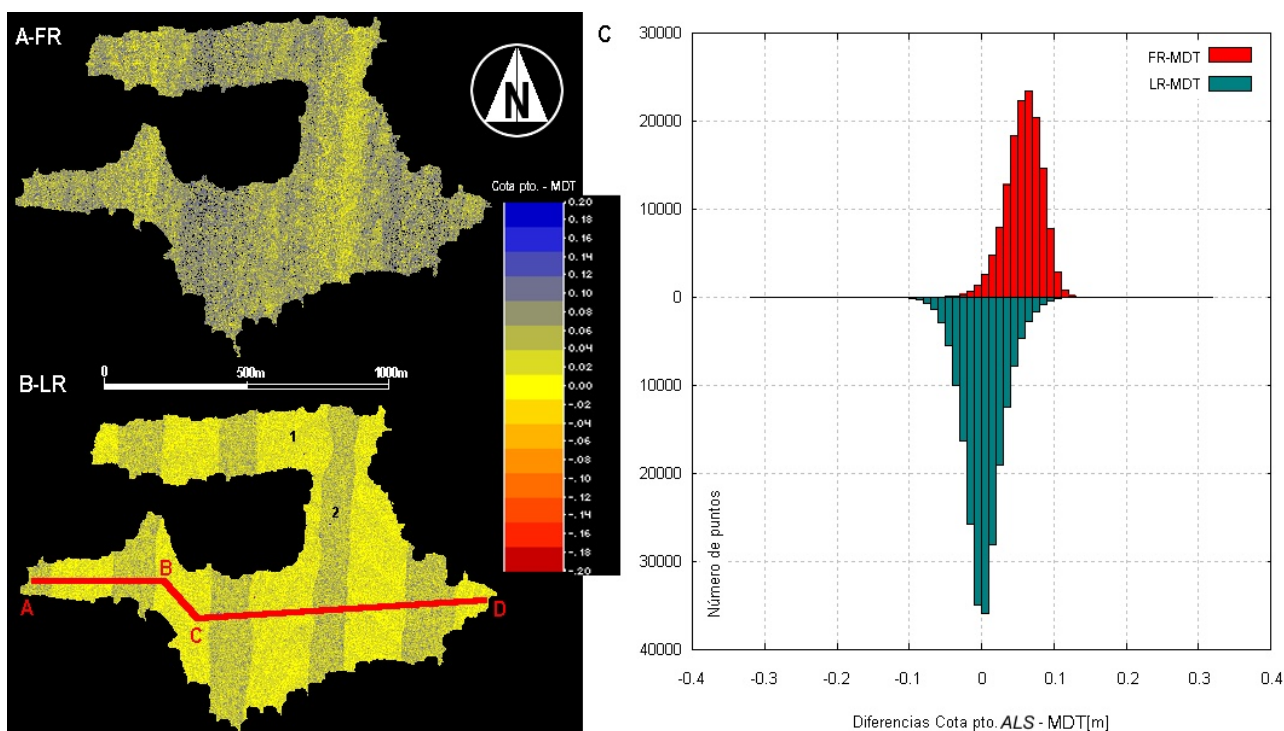


Figura 5.60. Distribución de las diferencias de los puntos *ALS* al MDT en áreas sub-horizontales (Lucio del Molinillo). **A:** Distribución espacial de las diferencias del primer retorno (FR) al MDT en metros. **B:** Distribución espacial de las diferencias del último retorno (LR) al MDT. Se incluye además el trazado del corte de la figura anterior **C:** Histograma de las diferencias de los puntos *ALS* con el MDT para el primer (FR-MDT) y el último retorno (LR-MDT). El ancho de clase es de 1cm.